

Collection EDYTEM

Numéro 12 - Année 2011

Coordination :
Stéphane Jaillet
Estelle Ployon
Thierry Villemain

IMAGES et MODÈLES 3D en MILIEUX NATURELS



Images et modèles 3D en milieux naturels

Coordination de l'ouvrage : Stéphane Jaillet, Estelle Ployon et Thierry Villemin



Comité éditorial de la Collection EDYTEM : Laurent ASTRADE (dir.), Jean-Jacques DELANNOY, Mélanie DUVAL-MASSALOUX, Marc DZIKOWSKI, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, André PAILLET, Yves PERRETTE, Magali ROSSI, Georges-Marie SAULNIER.

Comité de rédaction du présent numéro : Stéphane JAILLET, Estelle PLOYON, Thierry VILLEMIN.

Comité de lecture du présent numéro : Laurent ASTRADE, Xavier BODIN, William CASTAINGS, Philip DELINE, Dominique GASQUET, Christophe GAUCHON, Pierre GRUSSENMEYER (Insa, Strasbourg), Stéphane JAILLET, Laure NUNINGER (Chrono Environnement, Besançon), Estelle PLOYON, Antoine RABATEL (LGGE, Grenoble), Ludovic RAVANEL, Pierre-Jérôme REY, Xavier RODIER (Citeres, Tours), Georges-Marie SAULNIER, Thierry VILLEMIN.

Mise en page : André PAILLET.

Les personnes ci-dessus, citées sans indication de structure d'appartenance, sont membres du laboratoire EDYTEM.

NB : Les points de vue et conclusions développés dans les articles n'engagent que leurs auteurs.

La publication de ce volume a été réalisée dans le cadre de l'école thématique CNRS n° 1111093 «*Images et modèles 3D en milieux naturels*» qui a eu lieu du 14 au 17 juin 2011 au Bourget du Lac, soutenue par les structures suivantes :

Institut Écologie et Environnement (INEE),
les instituts INSHS, INSU et INS2I,
l'Université de Savoie et son UFR CISM,
le laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS,
la structure fédérative Vulnérabilités des Ouvrages aux Risques (VOR),
la Société Française de Photogramétrie et de Télédétection (SFPT),
l'Association Française de Topographie (AFT),
l'Association Française de Karstologie (AFK).

Imprimé par : Groupe Albert Brailly, ZI des Dragiez, 110 rue des Vergers, 74800 La Roche-sur-Foron.

Exemplaires disponibles au Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, Campus scientifique,
73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France, ou auprès de : sec-edytem@univ-savoie.fr

Site web du laboratoire : <http://edytem.univ-savoie.fr/>

On trouvera à la fin de cet ouvrage la présentation de l'ensemble des publications du Laboratoire EDYTEM

Dépôt légal : juin 2011

ISSN : 1762-4304 - ISBN : 978-2-918435-04-4 - EAN : 9782918435044

Éditorial

Ce numéro 12 de la Collection EDYTEM est à l'image des précédents : un espace ouvert d'expression dédié au croisement de regards scientifiques. L'accent est ici mis sur les méthodes dédiées aux représentations 3D des milieux naturels afin d'en extraire les données nécessaires aux recherches aussi bien en géosciences, en sciences de l'environnement, qu'en sciences humaines et sociales. En ce sens, l'esprit de la « collection EDYTEM » rejoint celui des écoles thématiques CNRS : se former en faisant se rencontrer des collègues issus de différents champs disciplinaires. Cela faisait longtemps que le laboratoire souhaitait organiser une école thématique : lieu de rencontres mais aussi support privilégié pour partager les savoir-faire que nous avons construits autour des plateformes de recherche du laboratoire.

C'est autour de la plateforme CTI3D (Cartographie, Topographie, Imagerie et 3D) que nous avons souhaité nous lancer, car cette plateforme a été au cœur de nombreuses coopérations scientifiques sur des problématiques et des objets très divers allant de la haute montagne aux tréfonds souterrains en passant par les dynamiques de versants.

Ce numéro recueille plus de vingt articles consacrés à l'imagerie et à la modélisation 3D. Je souhaite remercier vivement leurs auteurs pour leurs contributions qui permettent d'offrir au lecteur un très large panel de techniques, d'applications et d'appropriations des outils 3D actuels. Ce volume s'ouvre par quatre articles qui posent les concepts, les méthodes et les outils de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie. Les articles suivants constituent autant d'exemples d'application. Un tiers de ceux-ci sont issus des recherches menées par des collègues qui participent à l'école thématique. Les deux autres tiers concernent les travaux que mène le laboratoire EDYTEM en montagne (glaciers, parois, torrents...) et en milieu souterrain naturel.

En miroir à l'école thématique, ce nouveau numéro de la Collection EDYTEM repose sur le soutien de nombreuses institutions et structures de recherche qu'il m'est agréable de remercier au nom de l'ensemble du laboratoire. Mes remerciements vont, en premier lieu, au CNRS qui nous a accordé sa confiance pour l'organisation de l'école thématique « *Images et Modèles 3D en Milieux Naturels* » (n° 1111093, 14 au 17 juin 2011 au Bourget du Lac). Cette école a également reçu un fort soutien de l'Université de Savoie, du CISM (Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne), de la Fédération de Recherche VOR (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques) et de plusieurs associations scientifiques : SFPT (Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection), AFT (Association Française de Topographie) et AFK (Association Française de Karstologie). Je souhaite remercier ici chaleureusement les chevilles ouvrières de cette école thématique et de ce numéro de la Collection EDYTEM : Stéphane JAILLET, Estelle PLOYON, Thierry VILLEMEN, Laurent ASTRADE et André PAILLET.

C'est pour le laboratoire EDYTEM un réel honneur que d'accueillir cette école thématique et de fédérer, le temps d'une semaine, une telle diversité disciplinaire souhaitant construire ensemble de nouveaux modes et outils d'acquisition et de traitements de données spatiales.

Jean-Jacques DELANNOY
Directeur du laboratoire EDYTEM

Images et modèles 3D en milieux naturels

Une école thématique à la croisée de disciplines

STÉPHANE JAILLET, ESTELLE PLOYON, THIERRY VILLEMIN

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

« L'artiste ne doit pas copier la nature mais prendre les éléments de la nature et créer un nouvel élément »

B. Gauguin

De tout temps l'homme a cherché à saisir et à construire une représentation de la nature. L'art d'abord, la science ensuite. Aujourd'hui plus encore, l'image et les représentations spatiales de cette « nature » sont au cœur des travaux de recherches tant dans le domaine des géosciences que des sciences de l'homme.

Ainsi, à la croisée de différentes disciplines, le vaste domaine de la modélisation et de l'image 3D occupe une place croissante obligeant les différents acteurs de la science à se rencontrer : géographes, géologues, archéologues du côté des utilisateurs, avec leur problématiques respectives ; topographes, géomètres, cartographes et géomaticiens, avec leur culture spécifique de la précision et du positionnement ; informaticiens, développeurs, constructeurs, qui aujourd'hui renouvellent et accélèrent les procédures d'acquisition et de traitement des données. Des géographes et des géologues utilisent des scanners, des géomètres investissent le milieu, des archéologues ont recours à des technologies de plus en plus pointues. Ainsi, les disciplines se croisent, sur le terrain ou derrière l'écran et, par le truchement de la modélisation 3D, proposent de nouvelles images, de nouvelles représentations des objets naturels investis.

Il semblait donc important de chercher à croiser plus encore ces différentes disciplines tout en assurant un espace de formation, base d'un langage commun. L'École thématique IM3D « *Images et Modèles 3D en Milieux Naturels* » se fixe cet objectif. De l'acquisition aux traitements des données, de la topographie aux géosciences, elle veut, entre lasergrammétrie et photogrammétrie, montrer la diversité des usages et l'intérêt du recours à la 3D.

ENTRE LASERGRAMMÉTRIE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

Les développements récents dans le domaine des scanners laser, en domaine terrestre et aéroporté permettent aujourd'hui d'acquérir des données à haute résolution spatiale et en 3D sur des objets naturels difficiles d'accès (haute montagne, parois rocheuses, grottes, torrents...). Après avoir été largement utilisée au cours du 20^e siècle, la photogrammétrie avait injustement été un peu mise de côté par les nouvelles techniques de lasergrammétrie et d'interférométrie radar. Elle renaît aujourd'hui en utilisant elle aussi des techniques de pointe comme l'imagerie numérique, le positionnement GPS et la mesure inertielle. De nombreux projets de recherche en archéologie, en architecture, et en urbanisme mais également dans le domaine des milieux naturels ont ainsi pu émerger et se développer à la faveur de ce foisonnement d'innovations.

Aujourd'hui plusieurs techniques coexistent : la lasergrammétrie terrestre, la lasergrammétrie aéroportée, la photostitution numérique et la corrélation automatique d'images. C'est autour de ces quatre thématiques que s'organise la première partie de cet ouvrage, avec les contributions d'Isabelle CLÉRY, Yves EGELS, Pierre GRUSSENMEYER, Tania LANDES, Marc PIERROT-DESSEILIGNY et Julien VALLET. A chaque fois, la théorie, les concepts, les méthodes et les outils sont présentés et font de cette partie un premier manuel pour approcher ces techniques.

Dans une seconde partie, les membres du laboratoire EDYTEM présentent une série de dix contributions toujours ancrées sur une problématique de recherche en rapport avec les travaux menés sur les milieux de montagne et karstiques. En effet, le laboratoire dispose depuis 5 ans d'une plateforme technologique CTI3D (Cartographie, Topographie, Imagerie et 3D). Equipée de récepteurs GPS de haute précision, d'un scanner lidar Optech et de divers appareils de mesure topographique, cette plateforme est une ressource clé pour les programmes de recherche développés en milieux naturels souvent difficiles d'accès (haute-montagne, torrents, parois, karsts...). C'est donc tout naturellement le fruit de ces recherches qui est en partie présenté ici, démontrant en quoi le recours à l'outil 3D a permis de faire un véritable saut qualitatif dans les problématiques et les questions posées.

Dans le même esprit, six contributions, provenant d'auteurs appartenant à d'autres laboratoires et participant à l'Ecole, enrichissent cette somme et constituent la troisième partie de cet ouvrage. L'ensemble de ces articles montre la richesse et la diversité des applications et des champs disciplinaires concernés aujourd'hui par l'imagerie et la modélisation 3D.

UNE ÉCOLE THÉMATIQUE CNRS

La structure « École thématique CNRS » offre un double intérêt : celui d'assurer un espace de formation envers les acteurs les plus jeunes (doctorants notamment) tout en privilégiant l'échange des savoirs et des techniques à tous les niveaux de la recherche.

Plus précisément, les objectifs annoncés de cette école sont :

- assurer une formation de haut niveau en lasergrammétrie et photogrammétrie, en privilégiant les aspects pratiques (acquisition réelle de données en extérieur, traitement des données sur logiciels dédiés (libres de préférence), etc.) ;
- faire le point collectivement sur les avancées techniques et méthodologiques de ces outils et leurs applications dans les différents domaines concernés par l'école thématique ;
- favoriser les échanges entre des communautés travaillant souvent de manière « cloisonnée » : les concepteurs et développeurs d'outils, les géomètres et topographes et les « utilisateurs » (géologues, géographes, archéologues...) ;
- faire émerger les champs (et/ou applications) de recherche encore peu voire non couverts par les différentes communautés travaillant sur les images et modèles 3D en milieux naturels ;
- faire émerger des projets (et/ou des réseaux) de recherches interdisciplinaires.

VERS UNE DÉMOCRATISATION DE LA 3D

L'avenir nous dira si ces rencontres interdisciplinaires auront été fécondes. Le nombre de personnes ayant répondu à cet appel, la bonne réactivité des réseaux et associations scientifiques qui ont apporté leur soutien à cette école, montrent déjà l'intérêt grandissant de cette thématique et la diversité des acteurs disciplinaires qui s'en saisissent.

Demain, les outils se démocratiseront de plus en plus. Les coûts d'acquisition matériels diminuent, les logiciels se diversifient, deviennent de plus en plus robustes, les utilisateurs se multiplient. Gageons que dans ces conditions, la recherche scientifique sur les milieux naturels saura franchir une nouvelle étape, comme les techniques sur lesquelles elle s'appuie l'ont fait il y a quelques années.

Sommaire

Éditorial, par JEAN-JACQUES DELANNOY	3
Images et modèles 3D en milieux naturels. Une école thématique à la croisée de disciplines, par STÉPHANE JAILLET, ESTELLE PLOYON, THIERRY VILLEMIN.....	5
 THÉORIES, CONCEPTS, MÉTHODES	9
Lasergrammétrie terrestre, par PIERRE GRUSSENMEYER, TANIA LANDES.....	11
La lasergrammétrie aéroportée, approches théoriques, concepts, méthodes, par JULIEN VALLET.....	29
La photogrammétrie, principes généraux et terminologie, par YVES EGELS.....	41
Evolutions recentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels, par MARC PIERROT DESEILLIGNY, ISABELLE CLERY.....	51
 APPLICATIONS - TRAVAUX DU LABORATOIRE EDYTEM	67
Quatre années de suivi de la morphodynamique des parois rocheuses du massif du Mont Blanc par laserscanning terrestre, par LUDOVIC RAVANEL, PHILIP DELINE, STÉPHANE JAILLET.....	69
Apport des données de LiDAR terrestre pour le suivi et l'analyse du déplacement d'un glacier rocheux (glacier du Laurichard, Hautes Alpes, France), par XAVIER BODIN.....	77
Consolidation par optimisation en vue d'une analyse diachronique par scanner laser terrestre de la falaise de glace du lac du miage (Massif du Mont Blanc), par CHARLES GRANGE, THIERRY VILLEMIN, STÉPHANE JAILLET, PHILIP DELINE, ESTELLE PLOYON, ANDREA TAMBURINI	85
Sept ans de suivi de la dynamique de la falaise de glace du lac du Miage (massif du Mont Blanc) par scanner laser terrestre, par PHILIP DELINE, CHARLES GRANGE, STÉPHANE JAILLET, ANDREA TAMBURINI.....	95
Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels. retours d'expériences, par LAURENT ASTRADE, ESTELLE PLOYON, STÉPHANE VEYRAT-CHARVILLON	107
Topographie, représentation et analyse morphologique 3D de drains, de conduits et de parois du karst, par STÉPHANE JAILLET, BENJAMIN SADIÉ, JUDICAËL ARNAUD, MARC AZÉMA, ELISA BOCHE, DIDIER CAILHOL, MARCO FILIPPONI, PATRICK LE ROUX, ERIC VARREL.....	119
Enregistrement et modélisation 3D de la fouille archéologique et paléontologique du cône d'entrée d'Ornac (Ardèche, France), par ELISA BOCHE, LYDIA GAMBERI A. de C, STÉPHANE JAILLET, BENJAMIN SADIÉ.....	131
Relevés lasergrammétiques et calibration sur calcite de morphologies externes de spéléothèmes pour une étude paléo-sismologique du Liban, par BENJAMIN SADIÉ, CORINNE LACAVE, JEAN-JACQUES DELANNOY, STÉPHANE JAILLET.....	137
Identification et extraction par segmentation de spéléothèmes de l'aven d'Ornac (Ardèche, France), par SOUHAIL HAJRI, BENJAMIN SADIÉ, STÉPHANE JAILLET, MATTHIEU THOMAS, JEAN-JACQUES DELANNOY	145
Acquisition et traitements de nuages de points 3D, par des techniques légères et à faibles coûts, pour l'élaboration de MNT à haute résolution, par ESTELLE PLOYON, STÉPHANE JAILLET, OLIVIER BARGE	155

APPLICATIONS - TRAVAUX PRÉSENTÉS À L'ÉCOLE THÉMATIQUE 169

Etude des changements morphologiques d'une rivière en tresses par LiDAR aéroporté,
par SANDRINE TACON, FRÉDÉRIC LIÉBAULT, HERVÉ PIÉGAY 171

Mission d'acquisition aérienne LiDAR pour des applications thématiques en écologie du paysage. Le cas des
Coteaux de Gascogne,
par SYLVIE LADET, DAVID SHEEREN, MATHIEU FAUVEL, WILFRIED HEINTZ, MARC DECONCHAT 177

Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France).
Approche multiscalaire,
par ALBANE BURENS, PIERRE GRUSSENMEYER, SAMUEL GUILLEMIN,
LAURENT CAROZZA, RAPHAELLE BOURRILLON, STÉPHANE PETROGNANI..... 183

Modélisation du diapir de Bakio (Pays Basque espagnol).
Exemple d'utilisation de données LiDAR pour la modélisation en 3D de surfaces géologiques,
par YOHANN POPRAWSKI 191

Plan urbain et SIG archéologique. L'exemple de Qalhat (Oman),
par EMMANUELLE RÉGAGNON, OLIVIER BARGE 193

Comparaison lasergrammétrie / photogrammétrie pour la mesure de l'érosion de pierres de façade
(abbatiale de Manglieu, Puy-de-Dôme),
par FRANCK VAUTIER, OLIVIER VOLDOIRE 199

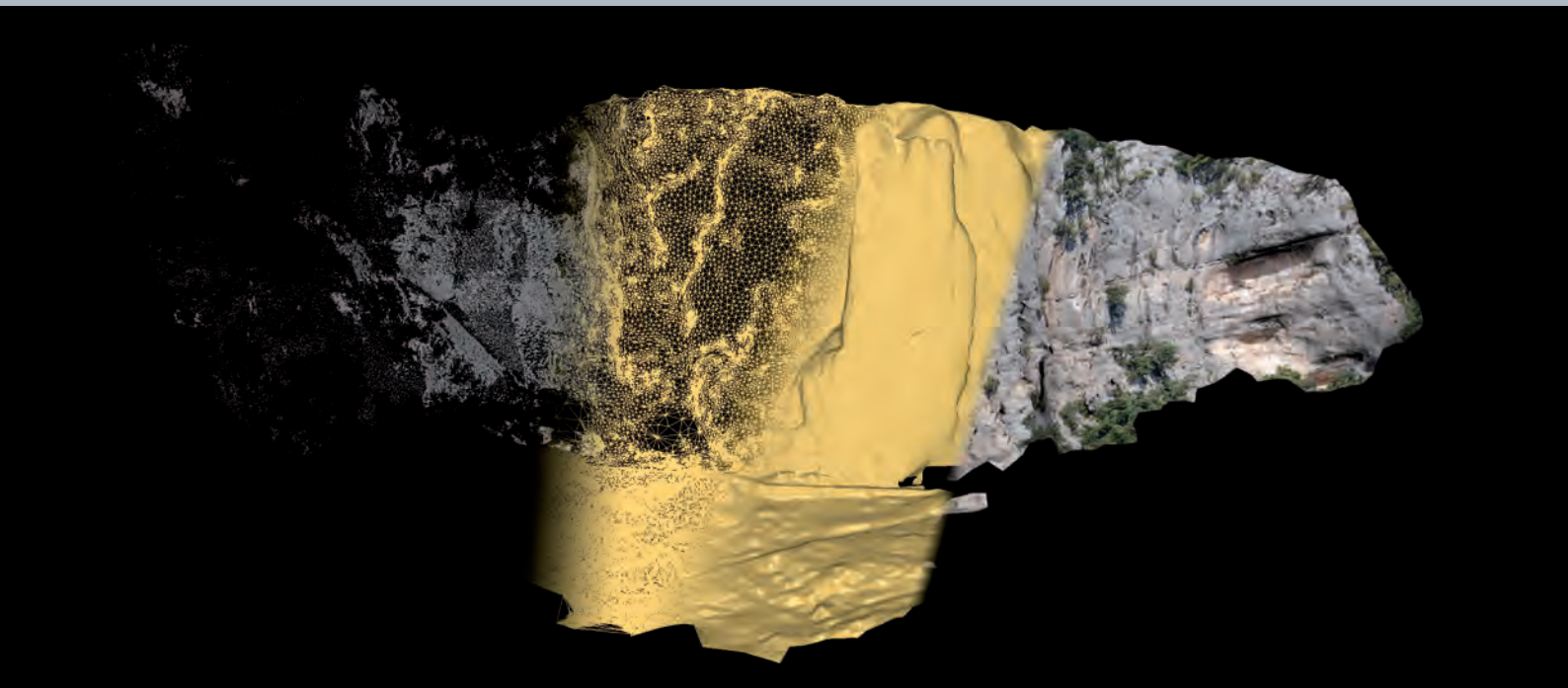
PRÉSENTATION DES ASSOCIATIONS

Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT) 207

Association Française de Topographie (AFT) 208

Association Française de Karstologie (AFK) 209

Théories Concepts Méthodes



Au recto :

Modélisation 3D de la paroi surplombant l'entrée originelle de la grotte Chauvet (Ardèche). L'objet, d'une soixantaine de mètres de hauteur, est d'abord scanné avec un lidar terrestre pour obtenir un nuage de point (à gauche). Celui-ci est maillé et représenté en filaire ou en lissé (au centre). Enfin les photos drapées sur le modèle offrent un rendu complet et satisfaisant de l'objet étudié. Une analyse volumétrique peut débiter pour étudier l'écroulement passé, responsable de la fermeture de la cavité. Assemblage et montage : Benjamin Sadier.

LASERGRAMMÉTRIE TERRESTRE

TERRESTRIAL LASER SCANNING

PIERRE GRUSSENMEYER, TANIA LANDES

Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection, UMR CNRS 7005,

INSA de Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, F 67084 Strasbourg Cedex, France.

Contact : pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ

Cet article a pour objectif de définir les principes fondamentaux de fonctionnement des Scanners Laser Terrestres (SLT), les sources d'erreurs, les modes d'acquisition et les méthodes de traitement des données. Après avoir défini le vocabulaire spécifique et le processus de balayage laser terrestre, une classification détaillée des différents types de scanners disponibles est proposée. Pour estimer la précision de chaque point d'un levé effectué par un capteur laser, l'ensemble des caractéristiques qui peuvent influencer la qualité des données produites par les appareils utilisés est à considérer. Une bonne connaissance des différentes sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire pour quantifier la précision des données. Le traitement des données laser terrestre abordent ensuite les étapes de prétraitement, de géoréférencement direct ou indirect, de consolidation ou de recalage, de segmentation, de modélisation et de texturage.

MOTS-CLÉS : LASERGRAMMÉTRIE TERRESTRE, NUAGES DE POINTS, ERREURS, TRAITEMENT DE DONNÉES, GÉORÉFÉRENCEMENT, CONSOLIDATION, SEGMENTATION, MODÉLISATION.

ABSTRACT

Basic principles of operating Terrestrial Laser Scanners (TLS) are presented in this paper, as well as errors sources, recording modes and data processing methods. Terminology and processing aspects of TLS are defined. A classification of different types of scanners currently available is proposed. In order to assess the accuracy of each point recorded by a laser scanner, we consider all features that may affect the quality of the data produced by a laser scanner. The knowledge of the different errors sources combined to the understanding of the relations between those errors is necessary to quantify data accuracy. Aspects of pre-processing point clouds, direct or indirect georeferencing, registration, segmentation, modelling and texturing are finally presented.

KEYWORDS: TERRESTRIAL LASER SCANNING, POINT CLOUDS, ERRORS, DATA PROCESSING, GEOREFERENCING, REGISTRATION, SEGMENTATION, MODELLING

INTRODUCTION

Le balayage laser terrestre est une technologie qui permet la saisie rapide et automatique de données spatiales tridimensionnelles avec une densité très élevée, sans nécessiter de contact direct avec l'objet d'étude. Les domaines d'application des techniques lasergrammétriques sont nombreux : conservation et restauration du patrimoine architectural et archéologique, topographie, suivi d'ouvrages, modélisation d'équipements industriels, du milieu naturel aérien ou souterrain, du milieu forestier, visualisation 3D, réalité virtuelle et augmentée, etc.

L'engouement pour l'utilisation des scanners laser terrestres (que l'on abrègera SLT) est essentiellement dû aux avantages que ces derniers présentent par rapport aux techniques d'acquisition conventionnelles. En effet, la collecte d'information sans contact avec l'objet permet d'éviter l'accès aux zones dangereuses. De plus, en saisissant d'énormes quantités de données en un temps réduit, l'emploi de cette technique permet non seulement de gagner du temps mais aussi d'éviter des retours sur le terrain pour compléter certaines parties. En termes de livrables, les nuages de points peuvent servir à extraire divers types de produits 2D (profils, coupes, plans) et 3D (modèles numériques de surface, modèles numériques de terrain, modèles numériques d'élévation). Malgré l'aspect révolutionnaire que veulent lui associer les constructeurs, la technique lasergrammétrique ne remplace toutefois pas les techniques topographiques conventionnelles (levé par stations totales, GPS, photogrammétrie, par exemple). Le rôle de l'opérateur s'en voit bouleversé, puisqu'il n'est

plus le guide de la mesure ; celui-ci intervient surtout en aval, une fois les données acquises. D'une manière brève et succincte on peut situer le balayage laser terrestre 3D par rapport aux autres méthodes d'acquisition connues dans le domaine de la géodésie :

- techniques et méthodes topographiques classiques : elles sont appropriées lorsqu'il s'agit d'acquérir des données avec une grande précision et que seule l'acquisition d'un nombre réduit de points caractéristiques est nécessaire ;
- techniques et méthodes de télédétection ou de photogrammétrie : elles sont utilisées pour l'acquisition de scènes larges ou complexes lorsqu'un nombre plus important de points ou d'objets est requis. Les mesures sont faites sur la base de photographies, d'images satellites, aériennes ou terrestres ;
- techniques et méthodes lasergrammétriques : elles sont utilisées pour la collecte d'un nombre conséquent de points 3D, en utilisant la lumière laser comme support d'information. Contrairement aux méthodes de topographie classique, l'acquisition signifie le balayage de surfaces entières, au lieu de l'acquisition de points individuels.

Le balayage laser terrestre peut être effectué à partir d'une station fixe ou d'une plateforme mobile (Alshawa *et al.*, 2007 ; Goulette, 2009). A bord d'une plateforme mobile, le SLT exige d'être accompagné des mêmes composantes que celles utilisées pour le LiDAR aéroporté (centrale inertielle, GPS ; Vallet, 2011). Dans le reste de ce document, seul le balayage laser terrestre fixe sera considéré.

I - DÉFINITIONS ET PRINCIPES

1 - Quelques définitions

a - Balayage laser terrestre

Le balayage laser terrestre est une technique d'acquisition de données utilisant la lumière laser pour mesurer directement, selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre (Pfeifer, 2007). Il consiste en une acquisition rapide et automatique des données couvrant une surface large et complexe, sans nécessiter son accessibilité. L'émission du laser est effectuée à des fréquences élevées permettant l'acquisition de plusieurs milliers de points dans un laps de temps très court. Les mouvements nécessaires aux déplacements du rayon laser sont mesurés avec précision et permettent de déduire le positionnement dans l'espace de tous les points d'impact du laser. Le scanner laser capte également l'intensité de chaque impulsion. Si le scanner est, en

plus, doté d'une caméra numérique, à chaque impulsion laser peuvent être associées des valeurs de couleur RVB (Rouge Vert Bleu).

b - Laser

Le terme LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Il s'agit d'un dispositif utilisant le principe de l'émission stimulée par pompage optique d'un système d'atomes ou de molécules, qui produit un rayonnement concentré en un faisceau très fin de lumière monochrome, dont la cohérence est très élevée et dont l'énergie est très directive (www.granddictionnaire.com).

c - Nuage de points

Ce terme (en anglais « *point cloud* ») désigne un ensemble tramé, représentant les points tridimensionnels sur la surface de l'objet relevé. Chaque point est

référéncé par des coordonnées (X, Y, Z), initialement dans le repère ayant le scanner pour origine. Le nuage de points est le résultat d'un balayage laser.

d - Densité de points

Elle se réfère au nombre de points par unité de surface. Le nuage de points doit être d'une densité suffisante pour pouvoir extraire les détails à l'échelle du projet. Elle est conditionnée par le choix de la résolution spatiale du balayage, c'est-à-dire par la distance moyenne séparant deux points successifs dans le nuage de points.

2 - Illustration synthétique

La Figure 1 explique d'une manière synthétique le processus de balayage laser terrestre d'une surface composée d'un cube posé sur un plan. Le scanner mesure la distance entre le scanner et des points sur la surface de l'objet, ainsi que l'angle horizontal et vertical. Ainsi, les coordonnées polaires de chaque point sont définies dans un référentiel relatif au scanner.

Les coordonnées des points sont fournies par les relations suivantes :

$$X = r \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi$$

$$Y = r \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi$$

$$Z = r \sin \theta$$

r : distance mesurée entre la source laser et le point sur l'objet

φ et θ : les angles d'orientation du rayon laser

Le balayage s'effectue selon une trame régulière, c'est-à-dire que l'utilisateur fixe les deux pas angulaires : le pas vertical et le pas horizontal qui décrivent la résolution spatiale. Le pas associé aux observations angulaires dans le plan vertical détermine la distance entre deux points successifs sur un profil vertical. Le pas associé aux observations angulaires dans le plan horizontal définit la distance entre deux profils verticaux voisins. Pratiquement, le balayage s'opère selon une grille 2D (matrice) dont l'espacement est défini par la résolution angulaire choisie, par exemple : $\varphi_{i+1} - \varphi_i = 1^\circ$ avec $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ et $\theta_{i+1} - \theta_i = 1^\circ$ avec $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$.

De plus il mesure la distance pour chaque point, notée $r = f(\varphi_i, \theta_j)$. Cette valeur est ensuite enregistrée dans une matrice dont les lignes et colonnes représentent le pas sur θ et φ (Figure 2).

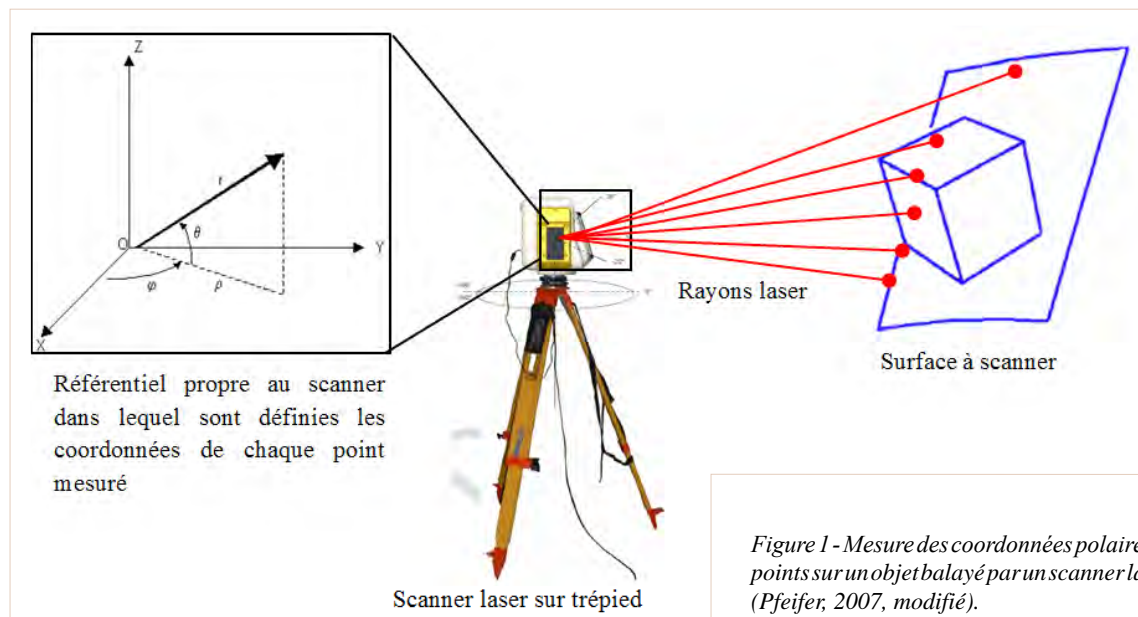


Figure 1 - Mesure des coordonnées polaires (φ, θ, r) des points sur un objet balayé par un scanner laser terrestre (Pfeifer, 2007, modifié).

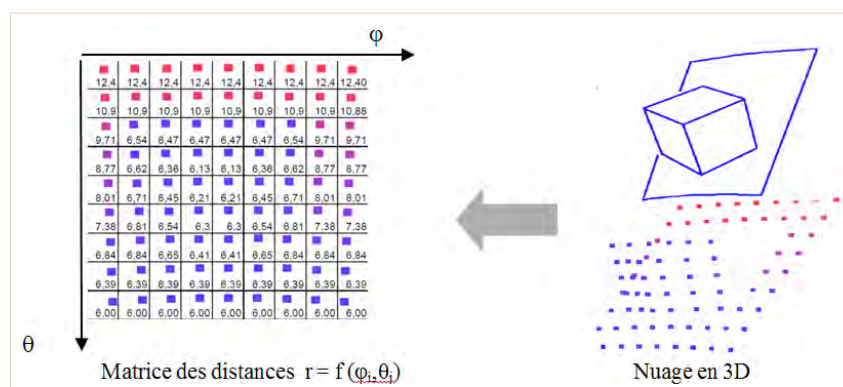


Figure 2 - Enregistrement des coordonnées polaires et nuage associé (Pfeifer, 2007, modifié).

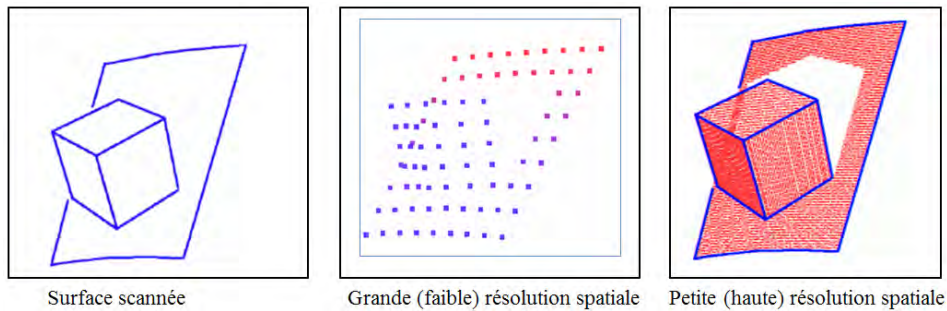


Figure 3 - Différences de résultats selon la densité de points choisie (Pfeifer, 2007, modifié).

Le nombre de points acquis par unité de surface définit la densité du nuage de points. Plus le pas angulaire est petit, plus la distance séparant deux points successifs est petite, et donc plus la densité est forte. La Figure 3 montre la différence de résultats obtenue suivant la densité de points choisie.

Evidemment, plus la densité est grande, mieux le nuage de points décrira l'objet scanné. Ainsi le niveau de détail visible dans le nuage de points est directement corrélé à la résolution spatiale choisie. Les arêtes du cube ne peuvent pas être scannées, elles peuvent être déduites de l'intersection, des plans moyens composant le cube. Néanmoins, le nuage de points à haute résolution spatiale s'en rapprochera a priori davantage que le nuage de points de faible résolution spatiale.

Comme l'illustre la Figure 3, le faisceau ne peut pas atteindre toutes les parties de l'objet (ombres laser). Il faudra envisager une nouvelle acquisition de cet objet depuis un second point de vue.

3 - Association d'information RVB aux points du nuage

Un scanner laser enregistre les coordonnées (cf. § 2), l'intensité et en général aussi des valeurs RVB pour chaque point. L'intensité laser représente la capacité d'un objet à réfléchir le rayonnement laser incident. Les valeurs RVB associées à chaque point du nuage sont quant à elles extraites d'une image numérique acquise sur l'objet scanné, à partir d'une caméra numérique, le plus souvent intégrée à l'appareil. Le nuage de points reflète alors d'une manière réaliste l'objet scanné (Figure 4).

Pour récupérer les valeurs RVB de la photo et les associer au point correspondant dans le nuage, il faut calculer, pour chaque point laser (X, Y, Z) les coordon-

nées-images (ζ, η) du pixel correspondant dans l'image numérique. Les transformations à considérer dépendent de la connaissance ou non des éléments d'orientation interne (DOI) et externe (DOE) de l'image. Si les DOI et DOE sont connues, on pourra se reporter à l'expression liant les coordonnées-images aux coordonnées objet, lors de l'orientation d'un cliché isolé. Si les DOI et DOE sont inconnues, on pourra appliquer une transformation linéaire directe (DLT), qui nécessite la connaissance de six points d'appui au minimum sur l'objet. Les points d'appui seront ici choisis parmi les points du nuage de points.



Figure 4 - Photo d'une façade de l'INSA de Strasbourg et nuage de points correspondant.

II - CLASSIFICATION DES SCANNERS

On peut classer les scanners en fonction de leur principe de mesure de distance, classification la plus répandue dans la littérature traitant des SLT. Les trois grandes catégories sont les scanners à mesure de temps de vol, à mesure de différence de phase et à triangulation.

1 - Scanners laser à impulsions

En anglais, cette méthode d'acquisition est appelée « *pulse method* ». Les scanners laser « à impulsions » sont, dans le langage courant, nommés scanners lasers « à temps de vol ». Ils sont équipés de distancemètres,

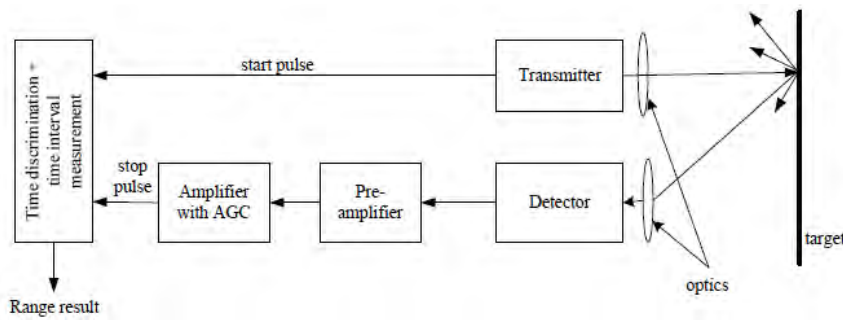


Figure 5 - Schéma des composantes d'un distancemètre à temps de vol (Reshetyuk, 2009).

qui emploient en général les composantes présentées dans la Figure 5, à savoir un émetteur laser, un récepteur laser, une horloge, un émetteur et un récepteur optiques.

Cette technologie utilise la mesure du temps de parcours (ou temps de « vol ») d'un rayon lumineux laser entre le scanner et le point d'impact sur l'objet visé. Les dispositifs de mesure sont liés à un système mécanique (miroir oscillant actionné par un moteur) permettant le balayage de l'objet étudié (Figure 6).

Le temps de parcours émetteur-objet effectué par le rayon laser s'exprime simplement :

$$D = c \cdot \frac{t}{2}$$

où : D : distance mesurée
 c : vitesse de la lumière
 t : temps de parcours

A partir de cette formule, et en considérant la vitesse de la lumière comme constante, on peut écrire que la résolution de la distance mesurée selon ce principe est dépendante de la résolution de temps. En d'autres termes, la capacité à mesurer de faibles intervalles de distances est directement dépendante de la capacité à mesurer de petits intervalles de temps (Baltsavias, 1999) :

$$\Delta D = c \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

où : ΔD : variation sur la distance mesurée
 c : vitesse de la lumière
 Δt : variation sur le temps mesuré

Pour un scanner à temps de vol, la précision de la mesure de distance dépend donc directement de la précision de la mesure de temps. Cela représente le grand

inconvenient des distancemètres à temps de vol et justifie pourquoi ils sont plus précis sur de longues portées.

Par exemple, si on souhaite mesurer un écart en distance de 1 mm, il faut disposer d'une horloge capable de mesurer une durée de :

$$t = \frac{2D}{v} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 6,7 \text{ ps}$$

Il est difficile de mesurer avec précision un tel temps de parcours, du moins avec une technologie simple et peu coûteuse. Pour contourner ce handicap, certains constructeurs utilisent une diode laser pulsée capable d'envoyer d'un grand nombre d'impulsions pour observer un même point. Ceci permet de diminuer l'écart-type sur la mesure de distance, en considérant la moyenne des distances observées. Par exemple, le scanner Trimble GX donne la possibilité d'effectuer plusieurs tirs par point mesuré (de 1 à 25 tirs/point). Plus on augmente le nombre de tirs par point plus le temps d'acquisition est long. Evidemment, cette précision n'est pas indéfiniment améliorée avec l'augmentation du nombre de tirs, en raison des erreurs systématiques entachant forcément les observations. Des études réalisées au sein du groupe PAGE à l'INSA de Strasbourg ont montré que, pour le scanner laser Trimble GX, le choix de 9 tirs par points permettait d'atteindre le meilleur rapport qualité/temps. La Figure 7 présente cinq modèles de scanners lasers terrestres à impulsions (ou temps de vol).

Si les SLT à temps de vol sont plus précis sur de longues portées, cette portée ne peut pas être infinie. Il ne serait pas juste de dire que la précision de mesure de distance est complètement indépendante de la distance mesurée, car elle est tributaire aussi de la puissance du signal réfléchi, qui dépend à son tour de la réflectivité de l'objet et de son éloignement. D'après (Lerma *et al.*, 2008) :

$$\sigma_D \cong \frac{c \cdot t}{2 \cdot \sqrt{SNR}}$$

où : c : vitesse de la lumière
 t : temps de parcours
 SNR : rapport signal sur bruit

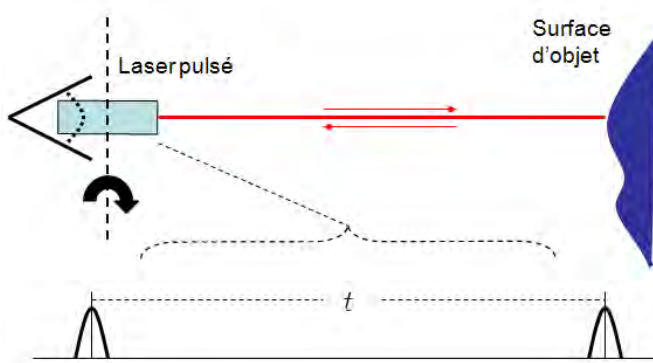


Figure 6 - Principe de mesure de distance par mesure de temps de vol (@mensi).



Figure 7 - Exemples de capteurs lasers terrestres à temps de vol : de gauche à droite : LEICA HDS2500, RIEGL LMS Z90, TRIMBLE GX, LEICA C10, OPTECH ILRIS (d'après @leica, @riegl, @trimble, @optech).

Les scanners lasers à moyenne et longue portée fournissent une incertitude sur la mesure de distance entre 5 mm et 50 mm sur une portée de 50 m.

En raison des inconvénients cités précédemment, d'autres systèmes ont vu le jour, basés sur la mesure de distance par mesure du déphasage de l'onde entre son aller et retour.

2 - Scanners laser à mesure de différence de phase

En anglais, cette méthode d'acquisition par mesure de différence de phase est appelée « *phase shift method* ». La mesure de distance par comparaison de phase consiste à diriger vers l'objet le faisceau d'un laser (continu, de forte intensité et modulé de façon sinusoïdale), et à comparer les phases des ondes émises avec celle des ondes retour. La différence de phase entre le signal émis et le signal reçu est mesurée à l'aide d'un phasemètre numérique. Cette technique est similaire à la mesure de distance électronique au tachéomètre.

Si la modulation est réalisée à la fréquence f , on peut lui associer une longueur d'onde de modulation λ . Lorsque le trajet total parcouru est égal à un nombre exact de longueurs d'onde λ de modulation, les ondes comparées ont la même phase. Par contre, si la distance est différente, on constate une certaine différence de phase $\Delta\phi$. Si on note D la distance station-objet, alors la distance parcourue par le rayon laser sera égale à $2 \times D$ et pourra s'écrire comme étant égale à un nombre N de longueurs d'onde plus un excédent d .

$$2D = N\lambda + d \quad \text{où} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

Donc la distance D pourra s'écrire :

$$D = \frac{N\lambda}{2} + \frac{\lambda\Delta\phi}{\pi} \Leftrightarrow D = \frac{c}{f} \left(\frac{N}{2} + \frac{\Delta\phi}{\pi} \right)$$

avec : $\Delta\phi$: Différence de phase mesurée par le phasemètre

f : fréquence de l'onde modulée

c : célérité de la lumière

N : nombre entier de longueurs d'onde le long du trajet du rayon laser

Ainsi les scanners à différence de phase contournent le besoin de mécanismes d'horloges en modulant le signal. Le problème consiste, à présent, à compter le nombre entier N de longueurs d'onde nécessaire au parcours aller-retour pour en déduire la distance D . A moins de connaître approximativement la distance à mesurer, une détermination unique ne permet pas de connaître la valeur de N . Pour lever cette indétermination sur N , (appelée aussi « ambiguïté » sur la distance) plusieurs méthodes existent. La première consiste à diminuer la fréquence de modulation, en prenant par exemple des fréquences en progression géométrique jusqu'à obtenir $N = 0$. Une autre solution consiste à émettre successivement un grand nombre de fréquences assez voisines pour que N ne change pas à chaque fois. Enfin, on peut aussi citer la méthode des fréquences emboîtées ou des fréquences proches.

La Figure 8 présente des exemples de scanners lasers fonctionnant sur ce principe.

La précision de mesure de distance dépend uniquement de la longueur d'onde modulée et le rapport signal sur bruit, par la relation suivante (Lerma *et al.*, 2008) :

$$\sigma_D \cong \frac{\lambda_m}{4\pi \cdot \sqrt{SNR}}$$

où :

λ_m : longueur d'onde modulée

SNR : rapport signal sur bruit

Ce type de scanner laser est adapté aux mesures de courtes à moyennes distances (portées inférieures à 80 m) et fournit des distances plus précises pour des courtes portées que les scanners laser à temps de vol.

Figure 8 - Scanners lasers à différence de phase ; de gauche à droite : FARO LS ; Focus3D (@FARO) ; LEICA HDS 7000 (@Leica) ; Z+F IMAGER® 5006i (@z+f imager).



La mesure de distances peut aussi être effectuée par triangulation, terme qui fait référence à la manière dont les géomètres opéraient pour résoudre un triangle et déterminer la position d'un sommet en particulier.

3 - Scanner laser à triangulation

Ces scanners calculent la distance sur le principe d'une résolution de triangle. La technique repose sur l'observation d'un point émis par une diode laser à l'aide d'un système optique récepteur, décalé par rapport à l'émetteur. Les trois éléments (le point d'impact, l'émetteur et la caméra) forment un triangle dont suffisamment de grandeurs sont connues pour en déduire les inconnues. En effet, les caractéristiques géométriques du faisceau émis ainsi que les positions respectives de l'émetteur et du récepteur sont connues (donc la distance L_b aussi) ; ajoutées à l'observation de la position du point sur l'objet mesuré (angles a et b), elles permettent de déterminer précisément, par trigonométrie, la position de ce point dans le repère du scanner (Figure 9).

Le capteur fait appel à un faisceau laser de faible puissance réfléchi par un miroir mobile. Comme l'indique la Figure 9, une caméra avec dispositif à transfert de charge CCD (*Charge-Coupled Device*) acquiert l'image du point sur l'objet. Le scanner mesure alors les deux angles de déflexion a et b et calcule la distance D à un point P de l'objet à l'aide de la relation suivante (Maillet, 1984) :

$$D_{AP} = L_b \cdot \frac{\sin(b)}{\sin(a+b)}$$

avec: D_{AP} : distance inclinée entre la source laser et le point P situé à la surface d'objet

L_b : longueur de base séparant le rayon émis et le rayon réfléchi

a : angle entre le rayon émis et l'axe vertical

b : angle entre le rayon réfléchi et l'axe vertical

Le défaut principal de cette technique est que la précision se dégrade avec le carré de la distance. D'après (Lerma *et al.*, 2008),

$$\sigma_D \cong \frac{D^2}{f \cdot L_b} \sigma_P$$

où : D : Distance scanner - objet

L_b : longueur de base séparant le rayon émis et le rayon réfléchi

σ_P : incertitude sur la position laser (dépend du type de capteur laser, de l'algorithme de détection de pic, du rapport signal sur bruit et de la forme de l'empreinte laser.

f : position effective de l'empreinte laser (longueur de la focale effective)

Les scanners laser à triangulation se destinent donc essentiellement à la mesure des courtes distances (jusqu'à 40 m pour le scanner laser Soisic de Mensi par exemple). Notons que des scanners à main ou à bras (par repérage de position), à lumière structurée ou par effet de moiré sont souvent utilisés pour des applications à très courte distance (de 0,1 à 1 mètre). Ce type de scanner utilise le procédé de triangulation, mais sans employer de laser. Une des caméras du système est remplacée par une source active de lumière pour illuminer l'objet en projetant sur ce dernier une figure géométrique connue (Guhring, 2001).

Pour conclure, le Tableau 1 présente une comparaison des différentes technologies de scanners présentées ci-dessus. Ce tableau a été réalisé sur la base des travaux de GIM International@ et i3mainz@, Lerma *et al.*, 2008.

Certains fabricants combinent les approches de mesure de temps de vol et de mesure de déphasage dans un seul et unique instrument de façon à exploiter pleinement les avantages des deux méthodes.

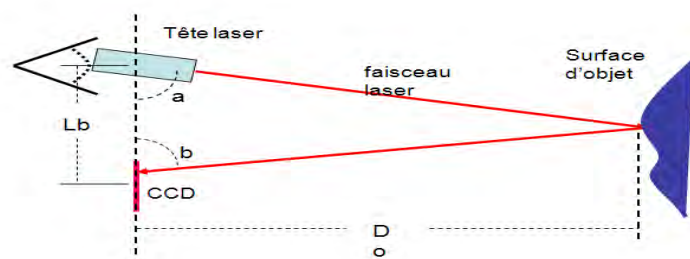


Figure 9 - Principe de mesure de distance par triangulation (@mensi, modifié).

Tableau 1 - Comparaison des types de scanners les plus courants.

	Précision sur la mesure de distance	Portée	Vitesse d'acquisition de points	Utilisation
Scanners à triangulation	1 mm à 1 m	de 0,1 à 10m	100 à 500 points/sec.	pièces de petite taille essentiellement
Scanners à mesure de différence de phase	5 mm à 50 m	de 0,5 à 80m (portée limitée)	100 000 à 500 000 points/sec.	chantiers à courte portée
Scanners à mesure de temps de vol	5 mm à 50 m	de 0,5 à 1200m (peu performant à courte distance)	100 à 50000 points/sec.	travaux topographiques

III - CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES D'UN SCANNER LASER TERRESTRE

Les spécifications de précision données par les constructeurs de scanners laser sont généralement établies dans des conditions idéales de mesures. Les expériences montrent que ces précisions surestiment souvent celles atteintes dans des conditions réelles. De plus, elles varient d'un instrument à l'autre et dépendent de la calibration et du soin avec lequel les instruments sont manipulés. Pour pouvoir estimer la précision de chaque point d'un levé effectué par un capteur laser, il faut considérer l'ensemble des caractéristiques qui peuvent influencer la qualité des données produites par les appareils utilisés. Cette partie a été rédigée notamment grâce aux travaux de Boehler *et al.* (2003).

1 - Précision angulaire

Les erreurs causées par les axes porteurs ou par le système de mesure d'angles provoqueront des erreurs perpendiculaires à la propagation du faisceau laser. Les erreurs peuvent être détectées en mesurant de courtes distances verticales et horizontales entre les objets, par exemple des sphères, qui sont situées à distances égales du scanner et comparées à celles dérivées de mesures issues d'appareils topographiques beaucoup plus précis.

2 - Précision/exactitude sur les mesures de distances

Comme évoqué plus haut, suivant le système de mesure de distance considéré, la précision sur la mesure de distance dépend de différents paramètres. On se reportera aux formules de σ_D vues précédemment pour chaque système. Comme évoqué, un paramètre non négligeable influençant la précision des données est le bruit de la mesure (qualité du rapport signal sur bruit).

Un test très facile à mettre en œuvre consiste à positionner une cible plane perpendiculairement à la direction d'observation du scanner et à la numériser sur la portée souhaitée. La dispersion des points autour du plan moyen peut être déterminée et caractérisée par un écart-type en distance, formule dans laquelle les écarts sont les distances de chaque point au plan moyen (précision de mesure).

L'exactitude sur la mesure de distance peut également être déduite de cette expérience, en connaissant la valeur vraie de la position de cette cible. Des cibles planes, cylindriques ou sphériques peuvent également être utilisées, à condition que leur position précise ait été relevée au préalable avec des instruments et des méthodes plus précises que ce que le scanner laser est susceptible d'atteindre.

3 - Résolution spatiale

Du point de vue de l'utilisateur, la résolution spatiale d'un scanner laser caractérise sa capacité à scanner l'objet en suivant une trame régulière plus ou moins dense, pour détecter de petits objets ou les détails de l'objet. D'un point de vue technique, la résolution du scanner laser est liée au plus petit intervalle angulaire qu'il soit capable de mesurer et à la taille de l'empreinte laser sur l'objet. En effet, si la taille de l'empreinte laser est supérieure au plus petit intervalle angulaire – donc au plus petit espacement entre deux points successifs –, le nuage de points résultant sera alors fortement bruité et la mesure peu fiable.

4 - Taille de l'empreinte laser

Le terme d'empreinte laser (en anglais « *spot* ») représente l'empreinte du faisceau laser sur l'objet à numériser. Sa taille dépend de l'ouverture du dispositif mais aussi de la divergence du faisceau laser. Evidemment, la taille de l'empreinte laser déterminera la taille des objets susceptibles d'être distingués dans le nuage de points. Deux détails ponctuels, situés tous deux dans la même empreinte d'un faisceau laser, ne pourront pas être résolus.

5 - Portée

La portée représente la distance minimale (et maximale) à laquelle le scanner doit ou peut se situer par rapport à l'objet, pour fournir des observations fiables. Elle dépend du type de scanner utilisé (à impulsions, à différence de phase ou à triangulation). Comme évoqué plus haut, les scanners déduisant la mesure de distance par triangulation ou par différence de phase sont plus appropriés pour travailler à courte portée, tandis que les scanners à temps de vol sont plus adaptés pour fonctionner à longue portée.

6 - Vitesse de balayage

On préférera le terme « scannage » ou « balayage » au terme « scan ». Cette vitesse définit simplement le nombre de points acquis en une seconde. Comme évoqué plus haut, les scanners à différences de phases sont plus rapides que les scanners à temps de vol, en raison des difficultés de résolutions de distance pour ces derniers.

7 - Et la sécurité ?

La lumière produite par les lasers est en général monochromatique, directionnelle et cohérente. Ces avantages sont aussi des inconvénients, puisque les lasers risquent alors d'endommager les tissus humains (yeux et peau). Dès les années 70, une classification a été établie en fonction de la dangerosité des scanners lasers (classe I, II, IIA, IIIA, IIIB et IV). Depuis 2002, elle compte sept classes (1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4), les chiffres augmentant avec la dangerosité du système. La plupart des systèmes de SLT sont affectés à la classe de sécurité 3R (correspond à IIIA dans l'ancien système), ce qui signifie « sans danger s'il est manipulé avec soin ». La sécurité dépend de la puissance maximale du signal en sortie, du principe d'acquisition et de la longueur d'onde (voir GIM International@, 2010).

8 - Champ de vision

Il s'agit du champ de vision global (intervalle angulaire horizontal et/ou vertical) qu'un scanner laser terrestre est capable de balayer. Les scanners « panorama » permettent de relever l'environnement complet autour de la station tandis que les scanners « caméras » sont limités à des champs étroits. Entre les deux, on peut citer le scanner « hybride » (Figure 10).

– **Scanner panorama** : ce type de scanner effectue des mesures de distances et d'angles dans un champ de vision de 360° dans le plan horizontal et d'au moins 180° dans le plan vertical. Cette caractéristique lui donne la possibilité de lever l'environnement direct englobant la station, excepté la partie située directement en dessous de l'appareil. Ce type de scanner est non seulement utile aux levés topographiques classiques, mais aussi et surtout aux levés d'équipements industriels complexes (en intérieur).

– **Scanner hybride** : le balayage s'effectue grâce à la rotation illimitée du scanner autour d'un seul axe. Généralement le balayage est effectué horizontalement, autour de l'axe vertical de l'instrument. En revanche, le champ de vision dans le plan vertical est limité à 50° ou 60°. Ce genre de scanners est communément utilisé pour scanner à longue ou à moyenne portée de l'objet et est adapté aux travaux topographiques courants (en extérieur).

– **Scanner caméra** : les scanners caméras effectuent les mesures de distances et d'angles dans un champ de vision particulièrement étroit aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Le champ angulaire couvert est de l'ordre de 40°x40°. Son principe de mesure est basé sur deux miroirs rotatifs d'axes orthogonaux et déviant le rayon dans l'espace objet.

9 - Logiciel(s) de post-traitement

En plus des caractéristiques liées directement au scanner laser, le logiciel d'acquisition et de traitement accompagnant l'appareil est de grande importance. Si l'acquisition par scanner laser est bien automatisée, ce n'est pas encore le cas pour les procédures de traitement du nuage de points. Donc un logiciel efficace de traitement pourra être considéré comme un atout supplémentaire au scanner laser terrestre (voir une sélection sur @simple3D).

D'autres facteurs importants d'un système scanner laser sont la facilité d'utilisation (au regard du poids par exemple, du câblage nécessaire, du pilotage) et la solution d'alimentation électrique. La rubrique *Product Survey* du site GIM International@ permet de comparer de façon interactive les caractéristiques d'une sélection de SLT (août 2007 et 2010).

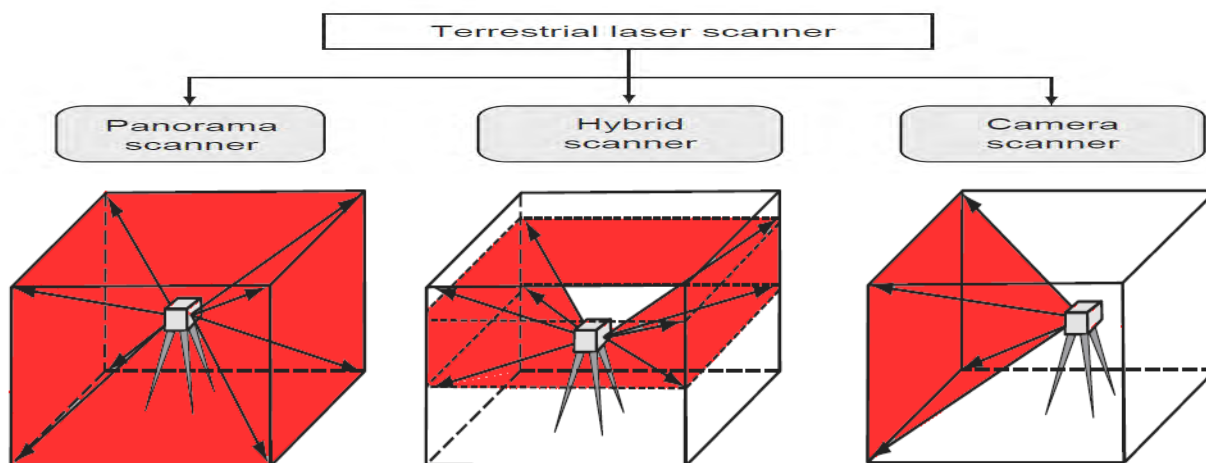


Figure 10 - Classification des scanners laser selon leur champ de vision (Staiger, 2003).

IV - SOURCES D'ERREURS SUR DES MESURES SCANNER LASER TERRESTRE

Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire pour quantifier la précision des données. Elles peuvent être classifiées selon quatre groupes (Staiger, 2005) :

- erreurs instrumentales ;
- erreurs liées à l'objet numérisé ;
- erreurs environnementales ;
- erreurs méthodologiques.

Les travaux traitant du sujet dans la littérature ont montré que le modèle des erreurs associé à des mesures effectuées à l'aide d'une station totale peut être transposé à celles faites par le biais de scanners laser terrestres. Néanmoins, le bilan des erreurs devra être complété, puisque la technologie du scanner employé ou la nature de l'objet numérisé jouent également un rôle dans ce bilan.

1 - Erreurs instrumentales

Les erreurs instrumentales sont dues à la conception du scanner et à ses caractéristiques techniques. Selon (Hebert et Krotkov, 1992), on peut distinguer les erreurs fondamentales inhérentes à la nature physique du matériel utilisé (par exemple le type de laser) et qui ne peuvent pas être corrigées par des modes opératoires. Les autres erreurs instrumentales sont causées par l'état mécanique du scanner (par exemple les erreurs d'axes). Ces erreurs peuvent éventuellement être supprimées ou minimisées par l'amélioration de la conception du système, ou par son étalonnage.

2 - Erreurs liées à l'objet numérisé

La première source d'erreurs provenant des caractéristiques des objets est sa réflectance, puisque les scanners effectuent des mesures sans réflecteur. D'après (Vögtle *et al.*, 2008), elle dépend des facteurs suivants :

- les propriétés des matériaux composant l'objet, telles que sa permittivité, sa perméabilité et sa conductivité de surface ;

- la couleur de la surface ;
- la longueur d'onde du laser ;
- l'angle d'incidence du faisceau laser ;
- la rugosité de surface, dont l'effet dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence ; une surface lisse et brillante risque de provoquer une réflexion spéculaire ;
- la température de la surface, notamment dans un environnement industriel : les radiations émises par la surface chaude diminuent la qualité du rapport signal-sur-bruit et par conséquent la précision de la mesure de distance ;
- l'humidité de la surface.

3 - Erreurs environnementales

Les facteurs environnementaux, tels que la température ambiante, la pression, l'humidité relative, l'éclairage, les vibrations du scanner sont des facteurs qui ne sont pas toujours négligeables lorsqu'on effectue des mesures avec un scanner laser terrestre. La propagation de signal dans l'atmosphère reste la source principale d'erreurs environnementales sur les mesures d'un scanner laser terrestre. Les mesures de distances effectuées la nuit sont plus précises que celles du jour, en raison de la perturbation provenant de la lumière ambiante.

4 - Erreurs méthodologiques

L'opération de balayage laser terrestre est dotée d'un niveau d'automatisme assez élevé comparé aux mesures tachéométriques par exemple. Par conséquent, l'erreur provenant des manipulations de l'opérateur est quasiment nulle au niveau de l'acquisition. Une fois le scanner en place et calé, son intervention peut se résumer au choix de paramètres de résolution du scannage.

Les erreurs peuvent néanmoins surgir lors de la phase de géoréférencement des nuages de points (voir § V.2).

V - TRAITEMENT DE DONNÉES SLT

1 - Prétraitement du nuage de points

La phase de prétraitement est souvent une étape nécessaire à l'obtention de données cohérentes. Son objectif est de réduire le bruit dans le nuage en appliquant un processus de correction et/ou de suppression de points faux et indésirables dans le nuage, afin de ne conserver que les points supposés d'intérêt. Si le nuage est affecté d'un bruit important (détectable en analysant le nuage obtenu sur une surface plane), il peut

être nécessaire de le filtrer avec des outils de filtrage comparables à ceux employés en traitement d'images (Smigiel *et al.*, 2011), visant à réduire la fréquence spatiale.

En plus du bruit inhérent aux mesures, des points indésirables sont relevés lorsque des objets sont situés entre la station et l'objet à scanner (en extérieur, présence d'obstacles tels que véhicules, arbres, piétons, ; Figure 11). D'autre part, en scannant une façade ayant des ouvertures transparentes telles que les portes

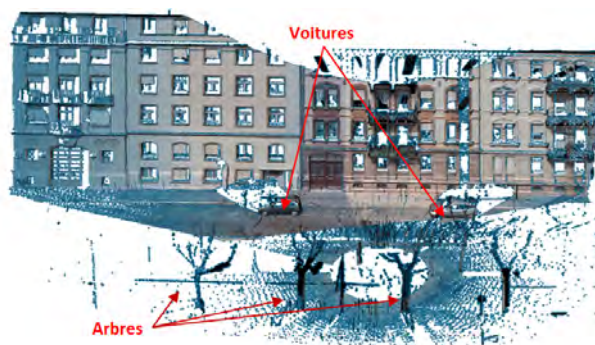


Figure 11 - Exemple de points indésirables, en présence d'obstacles entre le scanner et l'objet (arbres, voitures).

vitrées et les fenêtres, le faisceau laser pénètre dans les pièces et génère des points situés à l'intérieur des locaux (Figure 12). Ces points « intérieurs » sont moins gênants que les points provenant d'obstacles. En effet, les masques d'une part apparaissent dans le nuage de points et doivent être écartés lors d'un pré-traitement des données laser, mais surtout provoquent des ombres laser (trous) dans le nuage de la façade, donc une discontinuité dans la densité de points qui peut être pénalisante pour la suite des traitements. Ce problème peut être partiellement contourné par la multiplication des stations, à condition que l'obstacle ne soit pas attenant à l'objet.

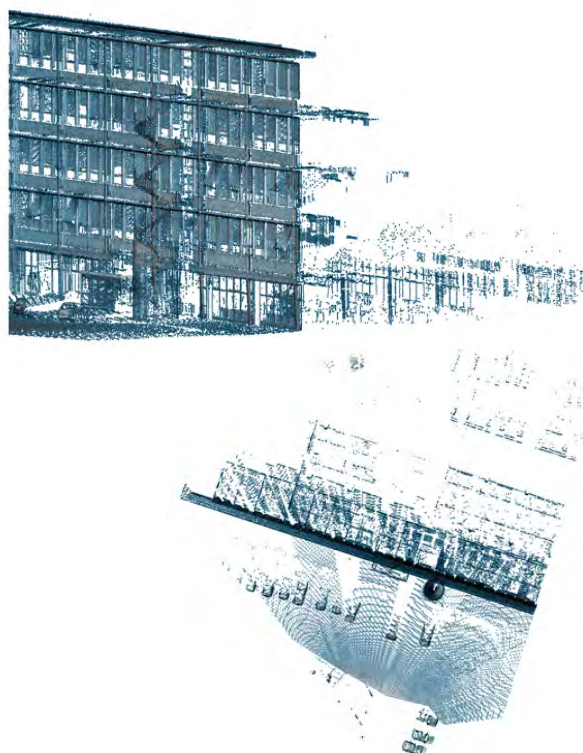


Figure 12 - Exemple de points indésirables dans un nuage de points laser terrestre, lorsque le faisceau traverse les ouvertures vitrées (à gauche, vue en perspective ; à droite façade vue du dessus).

Si la multiplication des stations s'avère indispensable pour contourner les masques, elle soulève un autre problème. En effet, à cause des recouvrements entre nuages, plusieurs points sont susceptibles d'être enregistrés plus d'une fois et la densité devient donc très importante dans ces zones de recouvrement. Cela crée une redondance de points qui alourdit encore davantage le nuage de points.

2 - Géoréférencement de nuages de points

Plusieurs philosophies de géoréférencement existent, suivant que le SLT ait été développé pour/par des géomètres ou pour/par des industriels. Le géoréférencement direct est possible avec des SLT conçus pour être centrés sur un point connu et orienté. Il peut ainsi prendre la place d'un tachéomètre au sein d'un cheminement polygonal. Ces SLT sont adaptés aux problématiques des géomètres, qui ont pour habitude de stationner des points connus avant d'effectuer un levé. Dans le milieu industriel, le rattachement n'est pas toujours indispensable, donc le géoréférencement indirect est plus approprié (Figure 13).

3 - Principe de consolidation (ou « recalage »)

Il arrive souvent qu'un objet ne puisse pas être numérisé à partir d'une seule station. Plusieurs raisons peuvent en être la cause : soit le champ de vision du scanner est limité, soit l'objet est de dimension importante, soit il est d'architecture complexe, ou encore, il se peut que des obstacles empêchent la visée directe. A ce moment-là, pour couvrir toutes les faces de l'objet, plusieurs points de vue différents sont nécessaires. Les nuages de points résultant de ces stations multiples sont définis chacun dans un repère relatif au scanner laser. Il faut donc regrouper dans un même système de coordonnées l'ensemble des nuages de points acquis depuis les différentes stations. Cette opération est désignée par le terme de « consolidation » (ou *registration* en anglais) et revient à effectuer un recalage relatif entre nuages.

La consolidation se fait par l'identification de « points homologues » dans les deux nuages à consolider (soit des cibles, soit des points caractéristiques). Pour cela, l'opérateur doit sélectionner au minimum trois paires de points homologues dans les deux nuages. Puis, les valeurs compensées des paramètres de la transformation peuvent être calculées. L'erreur de consolidation est ensuite calculée et représente la distance moyenne subsistant entre les deux nuages de points.

La question de la consolidation ne se pose pas lorsque le scanner est prévu pour être centré sur un point et orienté. On peut alors obtenir directement les coordonnées réelles des points numérisés au moment de leur relevé. Par conséquent, le nuage de points

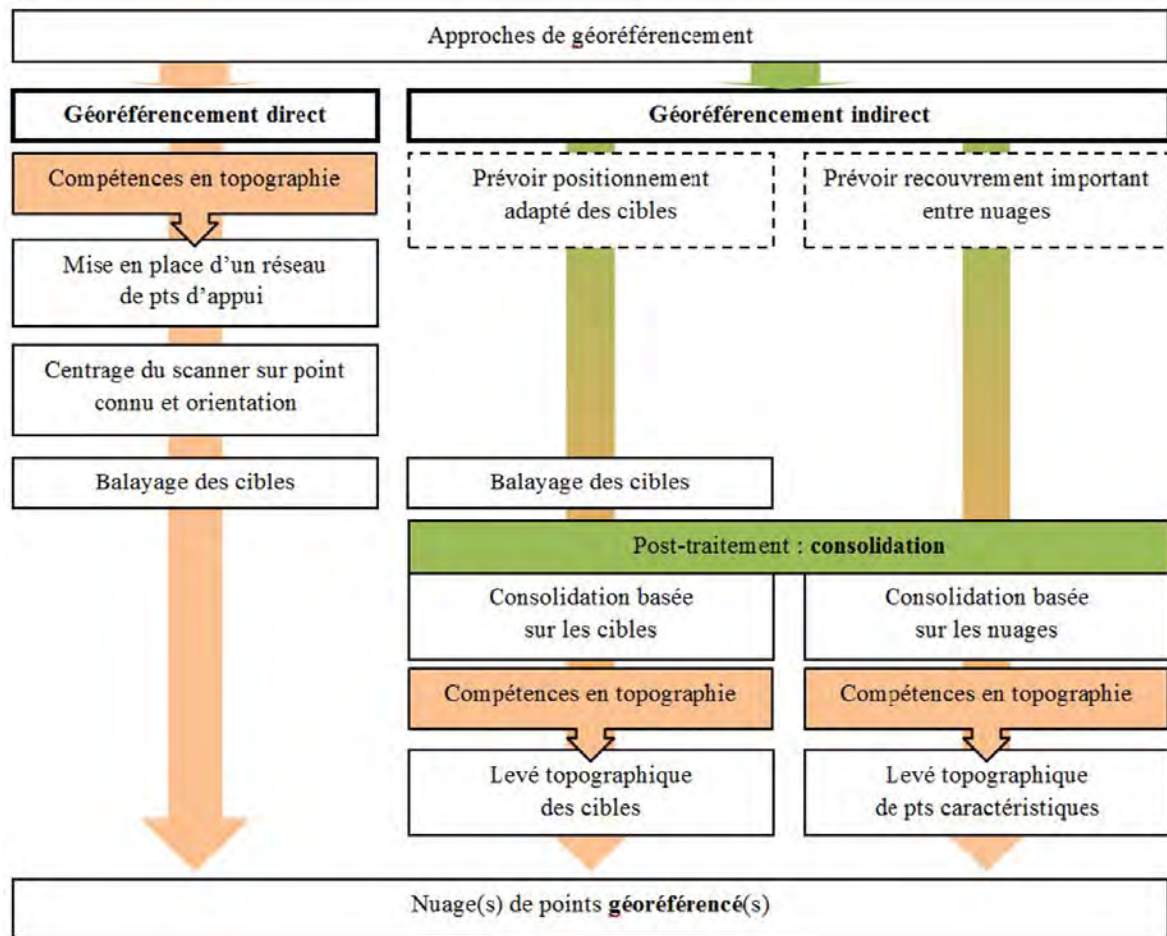


Figure 13 - Approches de géoréférencement de nuages de points acquis par scanner laser terrestre (inspiré de Lerma et al., 2008).

acquis depuis une station est directement géoréférencé au moment de l'acquisition. De la même manière, les différentes stations de scannage seront ramenées dans le même système de référence et tous les points seront regroupés. La Figure 14a montre le réseau de polygona-

lycée des Pontonniers de Strasbourg. La Figure 14b illustre les nuages de points colorés en fonction des stations et couvrant une partie du bâtiment principal du lycée. L'ensemble des nuages, géoréférencés sur place, a permis de visualiser sur le terrain, sans post-traitement, l'ensemble du bâtiment scanné.

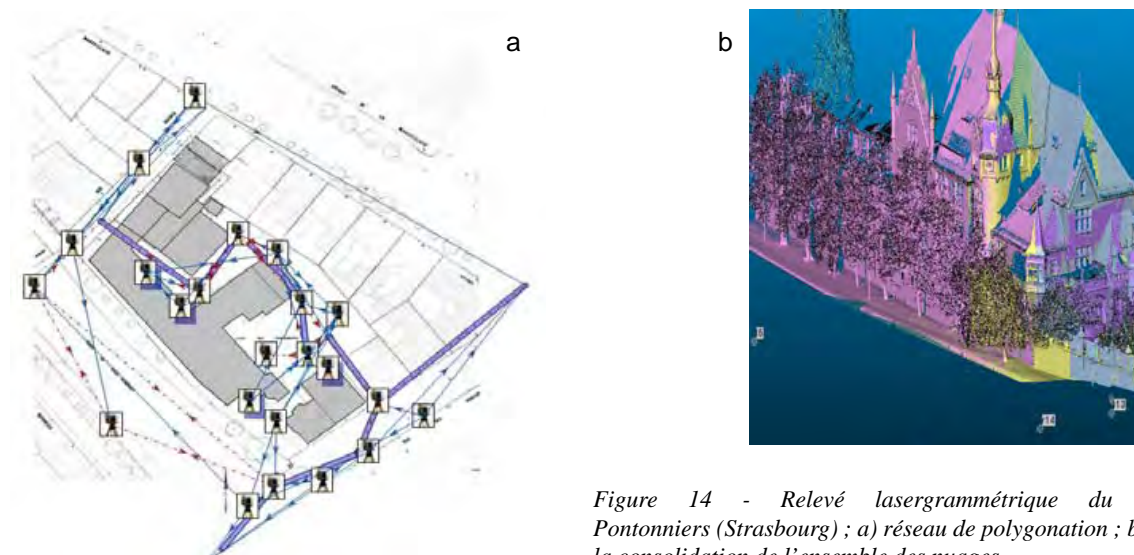


Figure 14 - Relevé lasergrammétrique du lycée des Pontonniers (Strasbourg) ; a) réseau de polygona-

4 - Consolidation basée sur les cibles

Les points « homologues » peuvent être des éléments remarquables de la scène numérisée, ou plus communément des cibles réfléchissantes aux caractéristiques physiques bien identifiées par le logiciel de traitement des données. La Figure 15 présente les deux types de cibles associées au scanner Trimble GX.

Pour les deux types de cibles, le logiciel d'acquisition du nuage identifie leurs centres qu'il utilise ensuite comme points de correspondance entre les nuages de points à consolider. Lors de l'acquisition, on veillera à ce qu'il y ait au moins trois cibles visibles depuis deux stations à consolider. Un nombre plus élevé de cibles est cependant souhaitable pour pallier d'éventuelles erreurs de mesure. La précision de mesure des cibles et la répartition des cibles dans l'espace affectent aussi la précision de la consolidation des nuages de points.

5 - Consolidation basée sur les nuages de points

Ce principe de la consolidation consiste à trouver automatiquement un certain nombre de points homologues dans les nuages de points que l'on envisage de consolider. A partir de ces points, les valeurs compensées des paramètres de transformation (rotation et translation) sont calculables. Pour des raisons de redondance et de gain de précision, il convient de prendre en compte plus de points communs, voire tous les points de l'objet présentant des formes géométriques caractéristiques.

Dans un souci d'automatisation, les chercheurs tentent de concevoir des algorithmes répondant à la question de consolidation sans avoir recours à l'intervention humaine. On peut considérer deux familles de méthodes employées pour consolider un nuage : les méthodes procédant par correspondance entre points et celles basées sur la correspondance entre entités géométriques.

a - Méthodes basées sur la recherche de points homologues

Parmi les méthodes basées sur la correspondance point à point, on peut citer les deux plus courantes qui sont la méthode de l'ICP et la méthode DARCES.



Figure 15 - Types de cibles employées avec le scanner Trimble GX ; de gauche à droite : cible plane ; sphère ; sphère modélisée sur la base du nuage de points la couvrant.

La méthode ICP (*Iterative Closest Point*) a été proposée par Besl et Mc Kay (1992) et est probablement la méthode la plus fréquemment employée dans les logiciels permettant de réaliser une consolidation automatique entre deux modèles de données géométriques. Par cette méthode, la consolidation est possible quelle que soit la nature des données géométriques (points, courbes de degrés différents, surfaces). Elle cherche à minimiser la distance entre deux nuages, par itérations successives. La consolidation exige de connaître des points homologues dans les différents nuages scannés. Dans tous les cas, l'ICP essaye de trouver les points homologues dans les nuages. S'ils n'existent pas, l'algorithme tente de remplacer le point homologue par le point le plus proche, d'où le nom de la méthode. La Figure 16 montre un exemple de recherche de points homologues entre deux courbes.

Besl et Mc Kay (1992) ont étudié les relations mathématiques nécessaires pour définir le point le plus proche spatialement (appartenant à un ensemble géométrique) d'un autre point connu. Par exemple, ils considèrent que la distance entre un point et un ensemble de points est définie par la distance minimale entre ce point et chaque point de l'ensemble. Le point de l'ensemble qui permet le calcul de ce minimum sera considéré comme étant le plus proche. Supposons que R soit la matrice de rotation et que T soit le vecteur de translation. La fonction f à minimiser est décrite par l'équation suivante :

$$f(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - R \cdot p_i - T\|^2$$

avec : R : matrice de rotation

T : vecteur de translation

N_p : le nombre de points du nuage le moins dense, situés dans la zone de recouvrement

x_i : un point du nuage « modèle »

p_i : son homologue dans le nuage des « données »

Pour pouvoir résoudre, par les moindres carrés, le système surdéterminé que représente l'équation précédente, on procède tout d'abord à la linéarisation de cette équation. Une fois les paramètres de transformation calculés, le nuage « données » sera transformé, et on peut réappliquer les étapes précédentes de manière itérative jusqu'à ce que les distances ne dépassent plus un certain seuil.

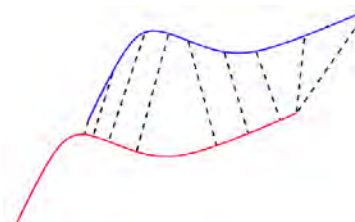


Figure 16 - Recherche de points homologues sur deux courbes à consolider, à partir d'un processus d'ICP (les correspondances sont présentées en traits pointillés).

Les inconvénients principaux de la méthode de l'ICP dans sa forme originale sont d'une part qu'elle converge vers un minimum qui risque d'être faux (minimum local), surtout lorsqu'il existe beaucoup de bruit dans les données. D'autre part, un grand nombre d'itérations est nécessaire à la convergence du modèle. Plusieurs solutions constituant les variantes de l'ICP ont été mises en œuvre pour surmonter ces inconvénients. Mais, en dépit de toutes les études qui essaient de trouver automatiquement les valeurs initiales de l'algorithme ICP et d'accélérer sa convergence, sa variante répandue en milieu industriel reste encore semi-automatique, en laissant la main à l'utilisateur pour sélectionner trois points homologues dans les deux nuages. Avec ces points de départ, il est possible de calculer une transformation rigide initiale pour ensuite démarrer les itérations.

La méthode DARCES (*Data-Aligned Rigidity-Constrained Exhaustive Search*) est proposée par Chen *et al.* (1999). Elle est destinée particulièrement au traitement des données 3D pour lesquelles le recouvrement est partiel. Pour chercher les points homologues dans les deux nuages, cette méthode profite des avantages de l'algorithme RANSAC. Il commence par le choix aléatoire d'un triplet de points dans le nuage « données » à consolider. Le nuage « données » subit les transformations de l'ICP (rotation+translation) pour s'aligner avec le nuage « modèle », considéré comme fixe pendant les calculs d'ICP. La méthode DARCES calcule les paramètres de la sphère passant par ces trois points. Ensuite, elle cherche les points, dans le nuage « modèle », qui appartiennent à la même sphère. Lorsque ce triplet est déterminé, on peut calculer les paramètres de la transformation et chercher par la suite le nombre de points qui appartiennent au nuage « modèle ». Ce nombre est appelé le nombre de chevauchement (*overlapping number*) et doit atteindre un maximum au cours de la procédure itérative de l'algorithme. C'est le seul indice sur lequel on puisse s'appuyer pour valider la transformation. L'algorithme cesse donc les itérations lorsque ce critère atteint son maximum. Bien entendu, les points du triplet ne doivent être ni trop proches ni trop espacés l'un de l'autre. Le choix aléatoire du triplet de points et du nombre d'itérations permettant de juger que les deux nuages sont bien consolidés est assuré par l'algorithme RANSAC.



Figure 17 - Exemple de consolidation de deux nuages (Fuchs, 2006).

La méthode DARCES repose sur l'hypothèse qu'il y a toujours des triplets de points homologues dans les deux nuages considérés. Or cela n'est pas toujours le cas, notamment si l'on acquiert des nuages avec des résolutions spatiales différentes. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de fixer une tolérance d'appartenance assez grande, ce qui peut conduire à des résultats imprécis. S'ils manquent parfois de précision, ces résultats peuvent tout de même être utilisés comme première approximation des inconnues que requièrent d'autres algorithmes comme l'ICP vue précédemment.

b - Méthodes basées sur la recherche d'entités géométriques

Les méthodes basées sur les entités géométriques ont pour objectif de chercher non plus des points, mais des entités géométriques homologues dans deux nuages à consolider, de type sphères, cylindres, droites par exemple. Ces méthodes supposent une reconnaissance préalable des entités géométriques de l'objet ou de l'ouvrage numérisé. On peut remarquer que ces méthodes ne sont pas indépendantes de celles basées sur la reconnaissance de points homologues.

L'avantage principal des méthodes basées sur les entités géométriques est qu'elles permettent de créer plus de paramètres facilitant l'établissement et le calcul des paramètres de transformation. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes n'exigent pas de valeurs approchées pour initialiser la transformation. Toutefois, leur handicap peut se révéler lors du manque de détails locaux proéminents ou saillants. S'ajoute à cet inconvénient celui du temps de traitement nécessaire pour extraire les entités et pour les sauvegarder.

On peut distinguer les méthodes qui se basent sur des surfaces et les méthodes qui se basent sur des arêtes. Par exemple, Sappa *et al.* (2001) ont utilisé les points des arêtes pour appliquer la méthode ICP. Ils ont démontré que cette démarche réduisait le temps de traitement comparée à l'utilisation de l'ICP seule. Cette démarche diminue aussi la sensibilité de l'ICP à la position initiale des nuages. Une arête est décrite ici par la meilleure fonction d'ajustement possible. Selon Sappa *et al.* (2001) les points de discontinuité formant les arêtes peuvent décrire soit des arêtes de pli (*crease edges*) entre deux surfaces d'orientations différentes, soit des arêtes de saut (*jump edges*) lorsqu'une rupture a lieu dans la surface elle-même. Ces mêmes auteurs suggèrent d'effectuer la modélisation en utilisant des courbes quadratiques, surtout pour les scannages effectués en milieu industriel. La Figure 17 montre un exemple de consolidation de deux nuages scannés depuis deux stations différentes. Le résultat de consolidation est affiché au milieu.

6 - Segmentation

La segmentation d'un nuage de points est un partage/subdivision de l'ensemble des points 3D en sous-ensembles (sous-nuage de points) homogènes, suivant des critères prédéfinis. C'est le procédé qui permet qu'un sous-ensemble de points appartenant à un même objet ou à une même surface puisse ensuite être traité, dans les étapes ultérieures, comme un objet. En général, ces points satisfont aux mêmes conditions mathématiques. Par exemple, l'ensemble des points décrivant une surface plane est pris en compte dans le calcul de l'équation du plan passant par ces points. La Figure 18 montre un exemple de nuage de points avant et après segmentation automatique en se basant sur la primitive géométrique « plan » (Boulaassal *et al.*, 2007).

Dans le domaine du traitement d'images, trois grandes familles de méthodes de segmentation peuvent être distinguées : la segmentation par seuillage, par frontières et par régions (Gonzalez *et al.*, 2004 ; Caloz et Collet, 2001). Dans le domaine du traitement de nuage de points, les méthodes de segmentation de données laser peuvent être regroupées en deux grandes

familles : l'une basée sur le principe de fusion (ou agrégation) et la seconde sur la reconnaissance automatique de formes géométriques.

a - Méthodes de segmentation basées sur le principe de la fusion

Cette famille regroupe les méthodes adoptant la technique de fusion pour segmenter le nuage de points, ce qui peut sembler paradoxal, puisque la segmentation est censée séparer les ensembles de points homogènes. Trois algorithmes méritent d'être cités : la croissance de surface, la segmentation par profil et la segmentation par division-fusion (Wang *et al.*, 2004).

b - Méthodes de segmentation basées sur la reconnaissance de formes géométriques

Deux algorithmes issus du domaine de la vision par ordinateur sont largement utilisés lorsqu'il s'agit d'extraire des formes géométriques. Il s'agit de l'algorithme de RANSAC (Fischler et Bolles, 1981) et de la transformée de Hough (Hough, 1962). Ces deux techniques ont fait leur preuve pour la détection automatique de primitives géométriques, même en présence d'une forte proportion de valeurs aberrantes. Tarsha-Kurdi *et al.* (2007) ont réalisé une étude comparative entre les algorithmes de Hough et de RANSAC, dans un objectif de détection automatique de plans des toits à partir de données laser aéroportées. Il en ressort que RANSAC est plus adapté au traitement des données laser en termes de temps de traitement et d'insensibilité au bruit affectant les nuages.

a



b



Figure 18 - Portion d'une façade de lycée des Pontonniers (Strasbourg) ; a) le nuage de points après prétraitements ; b) résultats de segmentation du nuage de points selon la primitive géométrique « plan » (Boulaassal *et al.*, 2007).

7 - Modélisation

a - Types de modèles

Le but de la modélisation est de construire et de créer des liens entre des points caractéristiques du nuage, afin de construire un tout, qui peut être un bâtiment, une façade ou tout autre objet. Selon l'usage et la destination du produit final, le modèle doit reprendre certaines caractéristiques et propriétés de l'objet réel. Les architectes (Fuchs, 2006) font la distinction entre le modèle « reconstruit », le modèle « tel que construit » et le modèle « tel que saisi ».

– le modèle « reconstruit » est le modèle 3D, souvent utilisé en archéologie, pour la représentation des reconstitutions de vestiges en états fragmentaires. Dans ce cas, un modèle élaboré à partir des relevés seuls peut s'avérer insuffisant, c'est pourquoi les mesures sont complétées par l'expertise de spécialistes du domaine : archéologues, architectes... Ces derniers valident toutes les hypothèses émises lors de la modélisation pour aboutir au modèle complet reconstitué.

- le modèle « tel que saisi » représente l'objet tel qu'il existe au moment de l'acquisition des données. Les informations nécessaires à sa construction sont celles issues du relevé de l'objet uniquement. C'est une construction fidèle à l'objet en l'état, au moment de sa mesure.
- le modèle « tel que construit » est élaboré sur la base de plans ou de connaissances de l'objet, en plus des mesures effectuées sur celui-ci, sans aucune extrapolation, ni aucune hypothèse. Ce type de modèle est utilisé pour négliger, par exemple, l'effet de l'érosion sur la pierre et les altérations mineures dues au temps. Il s'agit de représenter l'objet dans son état idéal, tel qu'il était juste après sa construction (@tplm3D).

Les techniques de modélisation couramment utilisées et intégrées aux logiciels de traitements de nuages de points sont les méthodes de modélisation par maillage et les méthodes de modélisation géométrique. Il faut ajouter que le nuage de points, sans aucun traitement est déjà un produit final, puisqu'il est possible d'y effectuer des mesures (longueurs, écarts, diamètres...), de créer des profils, des plans à partir de sections dans le nuage, etc.

b - Principe de la modélisation par maillage

La modélisation par maillage est utilisée principalement pour représenter des objets difficiles à paramétrer du point de vue mathématique, dont la géométrie n'est pas triviale. Les algorithmes sur lesquels ces méthodes s'appuient sont en général des algorithmes de triangulation et des algorithmes basés sur la méthode des éléments finis (George et Borouchaki, 1997). Des facettes sont ainsi construites entre les différents points du nuage par triangulation de Delaunay. Son avantage est qu'elle permet d'aboutir à des modèles très fidèles à l'objet relevé, en esquissant son allure réelle, donc des modèles « tels que saisis ». La Figure 22 montre deux exemples de modèles maillés. Contrairement au nuage de points, qui décrit l'objet à partir de points sans connexions entre eux, le modèle maillé génère une surface en reliant les points entre eux.

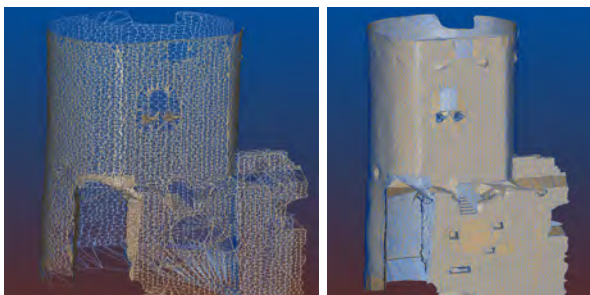


Figure 22 - À gauche : modèle maillé ; à droite modèle maillé surfacique (château d'Andlau, Alsace).

L'inconvénient de cette méthode réside dans la lourdeur des fichiers finaux. En effet, les données ne sont pas optimisées, dans le sens où même la surface d'objets à géométrie simple tels que des plans, comportent une densité de points semblable aux surfaces complexes. Pour optimiser le nuage, cette méthode exige donc des post-traitements permettant de combler les trous et de simplifier les zones où les facettes sont trop nombreuses. Pour ces raisons, lorsque l'objet le permet, il est judicieux d'avoir recours aux techniques de modélisation géométrique.

c - Principe de la modélisation géométrique

La modélisation géométrique est basée sur la construction des éléments identifiables et descriptibles d'un point de vue mathématique dans le nuage de points. Elle consiste à décrire l'objet à l'aide de primitives géométriques (plan, cylindre, sphère...) que l'algorithme tente de faire correspondre au nuage de points. Les modèles qui résultent de cette méthode sont géométriques et dits « tels que construits », car ils représentent l'état de l'élément lors de sa conception ou lors de sa construction initiale sans les éventuelles déformations ou dégradations liées au temps. Cette méthode présente un gros avantage lié au fait que l'ensemble du nuage est réduit à de simples formes géométriques décrites par quelques paramètres, ce qui génère des fichiers bien plus légers qu'avec un modèle maillé.

Par ailleurs, contrairement à la modélisation par maillage, le modèle résultant de la modélisation géométrique est plus sobre au niveau esthétique. Il représente l'objet sous une forme géométrique parfaite, sans les dégradations qu'il a pu subir au fil du temps. La modélisation géométrique peut se faire selon trois techniques différentes : une modélisation filaire, une modélisation surfacique ou une modélisation volumique.

On peut évidemment combiner les deux principes de modélisation, pour obtenir un modèle hybride. Ainsi, les parties de l'objet qui sont bien définies mathématiquement sont modélisées géométriquement (tels que les murs, les piliers, etc.), et les parties ayant des formes complexes (telles que les statues, sculptures, etc.) sont plutôt modélisées par maillage.

8 - Texturage du modèle 3D

Après avoir calculé un modèle 3D ou 2D à partir d'un nuage de points laser, on peut associer un rendu aux facettes ou primitives géométriques calculées, soit en utilisant une texture réelle (à partir d'images numériques), soit en utilisant une texture quelconque (motif choisi dans une bibliothèque de textures). Dans le premier cas, on peut extraire l'intensité colorée soit des images acquises en parallèle au nuage de points (caméra intégrée) soit de photographies existantes. On parle alors de modèle « photo-réaliste » (Figure 23).

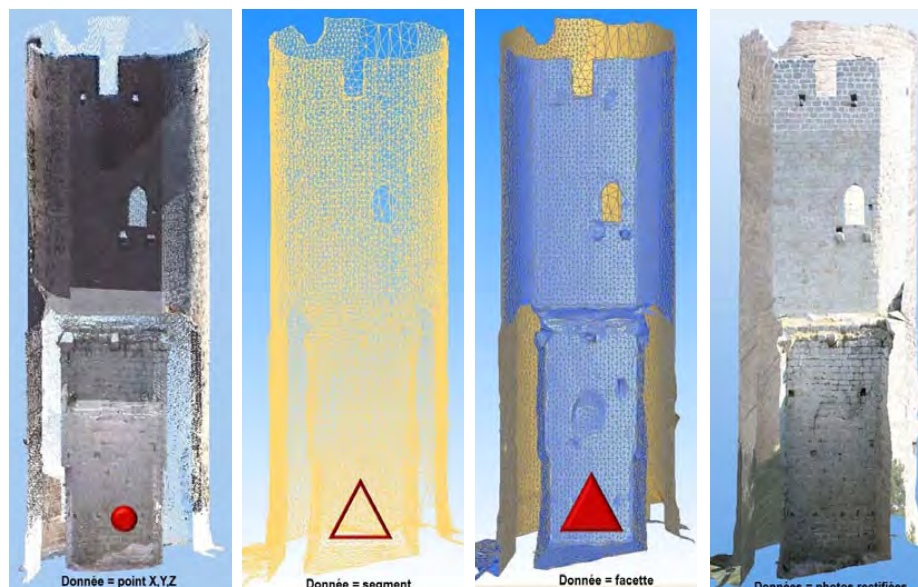


Figure 23 - De gauche à droite :
 - nuage de points colorés ;
 - modèle maillé ;
 - modèle maillé surfacique ;
 - modèle photo-réaliste ;
 (tour Sud du château d'Andlau, Alsace).

CONCLUSION

Cette présentation a permis de définir les principes fondamentaux de fonctionnement des scanners laser terrestres et les sources d'erreurs, les modes d'acquisition et les méthodes de traitement des données. Ces quelques pages ne sauraient cependant se substituer aux récents ouvrages de référence sur le sujet (Vosselman et Maas, 2010 ; Reshetyuk, 2009 ; Shan et Toth, 2008 ; Lerma *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2008, English Heritage, 2007).

Si les vitesses d'acquisition des SLT ont considérablement augmenté depuis 5 ans (d'un facteur 10 à 20 selon les systèmes), le volume des données générées par les relevés lasergrammétriques pose le problème de la gestion et du traitement des masses de données, de l'archivage des nuages de points et des moyens informatiques associés. Le géoréférencement des nuages de points constitue un aspect important du traitement des données, notamment dans l'optique d'une comparaison

des nuages de points à différentes époques. Le traitement des nuages de points permet de produire des modèles géométriques en 3D de qualité avec des méthodes semi-automatiques. Cependant, la colorisation des nuages de points et le texturage automatique des modèles maillés à partir de données de caméras internes au scanner ou d'images numériques issues de relevés panoramiques ou photogrammétriques constituent encore un verrou technologique. Les formats de diffusion des modèles produits à partir des données SLT sont souvent liés aux logiciels commerciaux des constructeurs, d'où des problèmes d'échanges de données entre utilisateurs. Le format Pdf-3D constitue une solution intéressante qui présente l'avantage d'être lisible par le logiciel Adobe Acrobat Reader, tout en donnant accès à différents outils de mesures et de dessins associés (tracé de sections, mesure de surfaces et de distances, représentation des modèles filaires, surfaciques ou photo-réalistes).

Remerciements

Ce cours a été élaboré en collaboration avec Hakim Boulaassal (Boulaassal, 2010), doctorant au sein du Groupe « Photogrammétrie Architecturale et Géomatique » à l'INSA de Strasbourg de 2007 à 2010.

BIBLIOGRAPHIE

- ALSHAWA M., SMIGIEL E., GRUSSENMEYER P., LANDES T., 2007. Integration of a terrestrial Lidar on a mobile mapping platform: first experiences. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'07, 29-31 may, 2007, Padua, Italy, 6 p.
- BALTSAVIAS E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 199-214.
- BESL P.J., MCKAY N.D., 1992. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Pattern Analysis Machine Intelligence*, 14, 2, 239-256.
- BOEHLER W., BORDAS VICENT M., MARBS A., 2003. Investigating Laser Scanner Accuracy. Antalya (Turkey), CIPA, *International archives for Documentation of Cultural Heritage*, XIX, 696-701.

- BOULAASSAL H., 2010. Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. Thèse doctorat de l'Université de Strasbourg, <http://scd-theses.u-strasbg.fr/1785/>
- BOULAASSAL H., LANDES T., GRUSSENMEYER P., TARSHA-KURDI F., (2007). Automatic segmentation of building facades using Terrestrial Laser Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, XXXVI, 3 / W52, 2007, 65-70.
- CALOZ R., COLLET C., 2001. Précis de télédétection, vol. 3, Traitements numériques d'images de télédétection, Presses de l'université du Québec, Agence universitaire de la Francophonie, ISBN 2-7605-1145-6(v-3), 386 p.
- CHEN C.S., HUNG Y.P., CHENG J.B., 1999. RANSAC-Based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images. *IEEE Pattern Analysis Machine Intelligence*, 21, 11, 1229-1234.
- ENGLISH HERITAGE, 2007. 3D Laser Scanning for Heritage: advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture. Product code 51326. <http://www.english-heritage.org.uk/publications/3D-laser-scanning-for-heritage/>
- FISCHLER M.A., BOLLES R.C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with application to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24, 6, 381-395.
- FUCHS A., 2006. Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique. Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1 en Sciences de l'Architecture. http://www.scd.uhp-nancy.fr/docnum/SCD_T_2006_0166_FUCHS.pdf
- GEORGE P-L., BOROUCHAKI H., 1997. Triangulation de Delaunay et maillage, application aux éléments finis. Edition HERMES, Paris. ISBN 2-86601-625-4, 432 p.
- GONZALEZ R.C., WOODS RE., EDDINS SL., 2004. Digital Image processing using MATLAB. Printed in the United States of America, Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-008519-7, 609 p.
- GOULETTE F., 2009. Lasergrammétrie : relevés laser urbains par systèmes mobiles de cartographie. Association Française de Topographie, XYZ, 119, 21-26.
- GUHRING J., 2001. Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 4309: 220-231.
- HEBERT M., KROTKOV E., 1992. 3-D Measurements from Imaging Laser Radars: How Good Are They? *Intl. Journal of Image and Vision Computing*, 10, 3, 170-178.
- HOUGH P.V.C., 1962. Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Patent 3.069.654.
- LERMA J.L., VAN GENECHTEN B., HEINE E., QUINTERO M.S., 2008. 3D RiskMapping – Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Editor: Universidad Politecnica De Valencia, 261 p.
- LI Z., CHEN J., BALSAVIA E., 2008. Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008. Taylor & Francis Group, London, *ISPRS Congress Book, ISPRS Book Series*, 7, 527 p.
- MAILLET H., 1984. Le laser, principe et techniques d'application. Technique et documentation (Lavoisier).
- PFEIFER N., 2007. Overview of TLS systems, overall processing and applications, theory and application of Laser Scanning. ISPRS summer school 2007. Ljubljana, Solvenia.
- RESHETYUK Y., 2009. Terrestrial laser scanning: error sources, self-calibration and direct georeferencing. VDM publishing house ltd, ISBN 978-3-639-17550-9, 161 p.
- SAPPA A., RESTREPO-SPECHT A., DEVY. M., 2001. Range Image Registration by using an Edge-based Representation. *In Proceedings of the 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, (SIRS '01)*, 10 p.
- SHAN J., TOT, C.K., 2008. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press Taylor & Francis, London, 590 p.
- SMIGIEL E., ALBY E., GRUSSENMEYER P., 2011. Terrestrial Laser Scanning (TLS) data denoising by range imaging. *The Photogrammetric Record*, 26, 134, 21 p.
- STAIGER R., 2003. Terrestrial laser scanning: Technology, systems and applications. Second FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.
- STAIGER R., 2005. The geometrical quality of Terrestrial Laser Scanner. FIG Working Week, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005.
- TARSHA-KURDI, F., LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2007. Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3D Building Roof Planes from Lidar Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, XXXVI, 3 / W52, 407-412.
- VÖGTLE T., SCHWAB I., LANDES T., 2008. Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS), The XXIIth ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Comm. V, ISSN 1682-1750, XXXVII, B5, 1061-1066.
- VOSSELMAN G., MAAS H.G., 2009. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, 320 p.
- WANG M., TSENG Y.-H., 2004. LIDAR data segmentation and classification based on octree structure. XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Commission 3.

SITOGRAFIE

www.faro.com
www.gim-international.com
www.granddictionnaire.com
<http://hds.leica-geosystems.com>
www.i3mainz.fh-mainz.de
www.mensi.fr

www.optech.ca
www.riegl.com
www.simple3D.com
www.trimble.com
www.tplm-3D.fr
www.zf-laser.com

LA LASERGRAMMÉTRIE AÉROPORTÉE

APPROCHES THÉORIQUES, CONCEPTS, MÉTHODES

AIRBORNE LASER SCANNING

THEORETICAL APPROACHES, CONCEPTS, METHODS

JULIEN VALLET

Helimap System SA, Le Grand-Chemin 73, 1066 Epalinges, Suisse.

Contact : julien.vallet@helimap.ch

RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, la lasergrammétrie ou LiDAR aéroporté est une technique reconnue et quasi classique pour déterminer la topographie de notre environnement. L'article suivant aborde d'abord les aspects théoriques de cette technique au travers de ses composants (LiDAR, techniques de balayage, technique de géoréférencement direct) et de leurs sources d'erreurs. Les aspects liés à la performance du système, telles que la précision et la densité des informations, sont présentés. Les grandes quantités de données acquises par cette technique nécessitent un traitement spécifique pour les rendre utilisables. Les phases d'acquisition et de traitement, du calcul de trajectoire au produit final, sont décrites. Finalement, quelques exemples pratiques de relevés hélicoportés obliques en terrain montagneux viennent illustrer les capacités de cette technologie.

MOTS-CLÉS : *LiDAR, GÉORÉFÉRENCEMENT DIRECT, MNT, AÉROPORTÉ, FILTRAGE, ÉTALONNAGE, NUAGE DE POINT.*

ABSTRACT

Since about 10 years, airborne laser scanning (ALS) entered as a classical way of acquiring 3D data of our environment. This paper presents the theoretical aspects of this mapping technique through the components (LiDAR, scanning devices, and direct georeferencing sensors) and its error sources. The performance of such system, such as the mapping accuracy or the data density, is treated. The huge amount of data generated by ALS technique requires a specific post-processing to provide usable dataset for the users. The acquisition and processing phases, from trajectory processing to final product, are described. Finally, few practical experiences of oblique data acquired with a helicopter-based LiDAR system in mountain areas, illustrate the potential of this mapping technique.

KEYWORDS: *LiDAR, DIRECT GEOREFERENCING, DTM, AIRBORNE, FILTERING, POINT CLOUD, CALIBRATION.*

INTRODUCTION

Les relevés topographiques par technique LiDAR (*Light Detection And Ranging*) ou « lasergrammétrie » aéroportée font désormais partie du quotidien du topographe. Cette technique, apparue au milieu des années 1990, s'est très vite révélée d'une performance et d'une rapidité indiscutable. Aujourd'hui, grâce à l'évolution des capteurs et des techniques de géoréférencement, cette technique non invasive, complémentaire à la photogrammétrie, offre des possibilités de modélisation tridimensionnelle de notre environnement sans égal.

Avec une densité de plusieurs points par mètre carré et une précision absolue potentielle inférieure à 5 cm, il est possible d'obtenir rapidement des données 3D de n'importe quelle surface, aussi complexe soit-elle.

Les champs d'application sont devenus extrêmement nombreux et l'aménagement du territoire en

représente la part majoritaire : urbanisme, infrastructures, risques naturels, construction, recherche...

Le revers de la médaille de la lasergrammétrie est évidemment la quantité d'information à traiter, qui s'élève souvent à plusieurs centaines de millions de points. Si les logiciels de traitement des données 3D sont à même de gérer des giga-octets de données, les applications logicielles « métiers » en aval le sont en général moins. Le traitement des données est donc une étape cruciale et indispensable pour rendre utilisables ces données à tout acteur de l'aménagement du territoire.

Cet article présente d'abord les concepts théoriques du LiDAR aéroporté, puis les aspects de performance (précision). La méthodologie d'acquisition et le traitement sont abordés par la suite. Finalement, quelques exemples pratiques en environnement montagnard avec un système hélicoptère sont présentés.

I - PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

La technique de la lasergrammétrie aéroportée repose sur l'intégration d'un LiDAR à balayage à un système de géoréférencement direct. Les bases théoriques résumées ci-dessous sont décrites en détail par Vosselman *et al.* (2010).

1 - Le LiDAR

Le principe du LiDAR se base sur une mesure électronique de distance (MED). La distance est estimée par mesure du temps de propagation d'une onde électromagnétique entre l'appareil et l'objet selon la relation :

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (\text{E.1})$$

avec c vitesse de la lumière et t le temps de propagation aller-retour.

Deux techniques de mesure de la distance sont employées sur les LiDAR :

- la technique pulsée : un pulse est émis et le temps de propagation entre le pic d'émission et le(s) pic(s) de retour est mesuré. Les LiDAR aéroportés sont majoritairement de ce type (Figure 4) ;
- la technique à décalage de phase (Continuous Wave, CW) : le laser émet en permanence et on mesure le décalage de phase entre l'onde émise et le retour. Cette technique est plutôt utilisée sur les LiDAR terrestres, notamment à courte portée.

Un dispositif de balayage, constitué de miroirs en rotation, permet de dévier le faisceau laser au cours du temps et d'obtenir ainsi un ensemble de mesures de

distance sur une ligne donnée (Figure 1). Pour obtenir le balayage complet de l'espace, il faut déplacer le LiDAR (aéronef) selon l'axe perpendiculaire au plan de balayage (Figure 2).

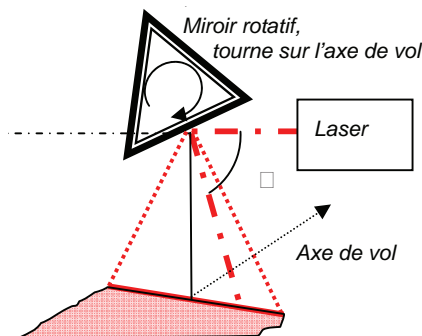


Figure 1 - Principe de fonctionnement d'un laser à balayage aéroporté. Le balayage s'effectue sur un axe orthogonal à l'axe de vol et le déplacement de l'aéronef est utilisé pour le balayage dans l'axe du vol. L'angle α représente l'angle du faisceau dévié par le miroir par rapport au faisceau incident émis par la diode laser.

Les caractéristiques principales d'un LiDAR à balayage sont :

- **Pulse Repetition Rate (PRR)** : il s'agit du nombre de pulses par seconde que le LiDAR peut émettre. Le PRR varie aujourd'hui de 10 à 400kHz. Selon le mode de balayage utilisé, le PRR ne correspondra pas toujours à la fréquence de mesure.

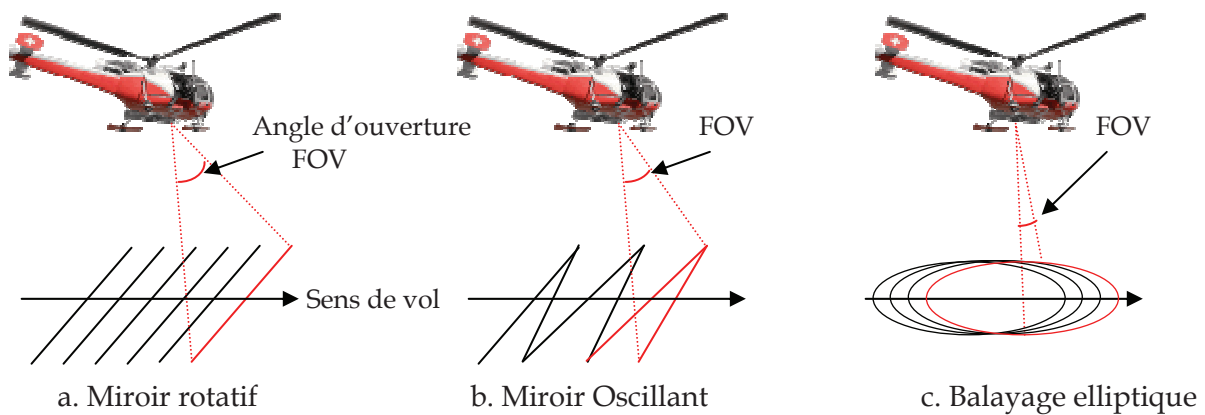


Figure 2 - Différents types de balayage du scanner. La partie en rouge montre la trace effectuée lors d'un balayage.

Pour les LiDAR à miroir multi-facette rotatif, seul 30 à 50 % des mesures sont gardées (fonction de l'angle d'ouverture). Ceci est dû au fait que l'angle de mesure α varie en général entre 60 et 120°, soit 1/3 des 180° utilisables par une face de miroir. La limitation du champ de vue (*Field of view*, FOV) est due au fait qu'avec un angle d'incidence trop oblique ($<60^\circ$ ou $>120^\circ$), l'intensité de retour devient trop faible et la mesure de distance devient trop incertaine (cf. sources d'erreur) ;

– **type de balayage** : le balayage dépend de la technologie de miroir utilisé. Les modes principaux sont illustrés à la Figure 2 ;

– **fréquence de balayage** : la fréquence de balayage correspond au nombre de lignes/ellipses dues à la rotation du miroir par seconde. Les fréquences usuelles des constructeurs varient de 10 à 100 Hz ;

– **divergence du rayon** : L'angle de divergence d'un laser caractérise l'ouverture du faisceau laser (Figure 3). Plus la divergence est petite, plus l'énergie émise est concentrée sur une petite surface.

Cette tache au sol est caractérisée par la relation :

$$fp = div \cdot d_{ALS} \quad (E.2)$$

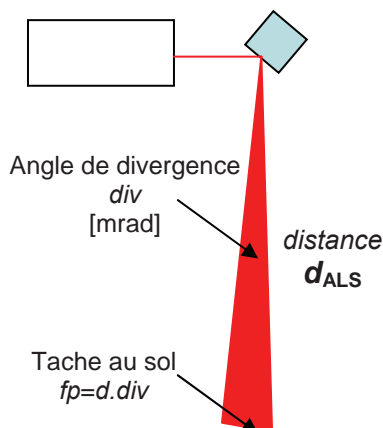


Figure 3 - Divergence du laser.

La divergence du rayon des LiDAR du marché varie de 0,2 à 3 mrad. La divergence est également à l'origine de la perte de précision de la mesure de distance avec la pente (cf. sources d'erreur) ;

– **plage de mesure de distance** : il s'agit de la gamme de distances mesurables par le laser. Cette distance va dépendre du PRR, de la longueur d'onde, de la réflectivité de la surface mesurée, de l'angle d'incidence du faisceau avec la surface, et de la puissance du laser. Le PRR sera le facteur limitant lorsque sa valeur est élevée. En effet, le principe du laser pulsé est de ne pas envoyer un pulse avant le retour de l'écho du précédent. Dès lors que l'on cadence à très haute fréquence, la vitesse de la lumière sera donc limitative pour une fréquence donnée et la distance maximale mesurable de manière univoque s'exprime selon :

$$d_{\max} = \frac{c}{2 \cdot PRR} \quad (E.3)$$

Il y a là un paradoxe du LiDAR : plus on vole haut, plus la fréquence d'acquisition sera basse...et pourtant, c'est là que cela serait le plus utile ! Pour palier cette aberration, certains LiDAR permettent d'envoyer plusieurs pulses, avant le retour du précédent (*Multi-pulse in the air*, MPiA) et d'avoir ainsi une fréquence élevée même à haute altitude. Néanmoins, ce mode ne fonctionne que si la dénivellation maximale de la zone à couvrir ne représente qu'un certain pourcentage de l'altitude de vol sur sol. Ceci pose alors un problème en zone très accidentée ;

– **longueur d'onde** : la réflectivité du matériau dépend de la longueur d'onde du LiDAR. Par exemple, la neige renvoie 80 % de l'énergie incidente jusqu'à 1100 nm puis seulement 10 % au delà de 1400 nm (Sergent *et al.*, 1995) ;

– **écho multiple** : la plupart des LiDAR ont la capacité de mesurer plusieurs échos (retour) pour un même pulse émis. L'amplitude et l'intensité de l'écho dépendent de la réflectivité de la surface touchée par le faisceau et de l'angle d'incidence avec l'objet (pente, divergence) (Figure 4). Cette carac-

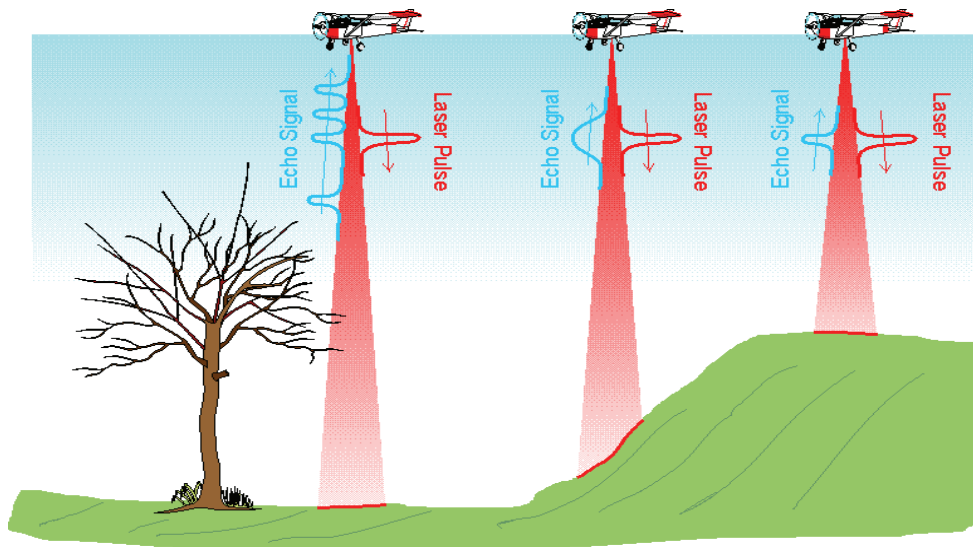


Figure 4 - Illustration des échos et de leurs amplitudes en fonction de la surface de réflexion (Riegl).

téristique est très intéressante car elle permet de mesurer des objets situés entre l'aéronef et le sol (branches, câbles, pylônes...) et surtout, elle permet d'obtenir une bonne définition du sol dans les zones à fort couvert végétal.

2 - Le géoréférencement direct

Pour connaître la position d'un point au sol dans le système de coordonnées sol, il faut connaître en plus de la distance et de l'angle du miroir, la position du laser ainsi que son orientation dans l'espace (Figure 5).

Ces éléments sont déterminés par un système de géoréférencement direct composé d'un récepteur GNSS (GPS-GLONASS) bi-fréquence et d'une Unité de Mesure Inertielle (*Inertial Measurement Unit*, IMU). L'IMU est composé de trois accéléromètres et trois gyroscopes qui mesurent sur chaque axe l'accélération \ddot{x} et vitesse angulaire $\dot{\theta}$ à une fréquence de 100 à 400 Hz. Les biais temporels des composants de l'IMU nécessitent un recalage régulier par des mesures externes : la position et la vitesse GPS. L'intégration des mesures GPS et inertielle via un filtre de Kalman permet de fournir position et orientation tout au long du vol (Skaloud, 1999).

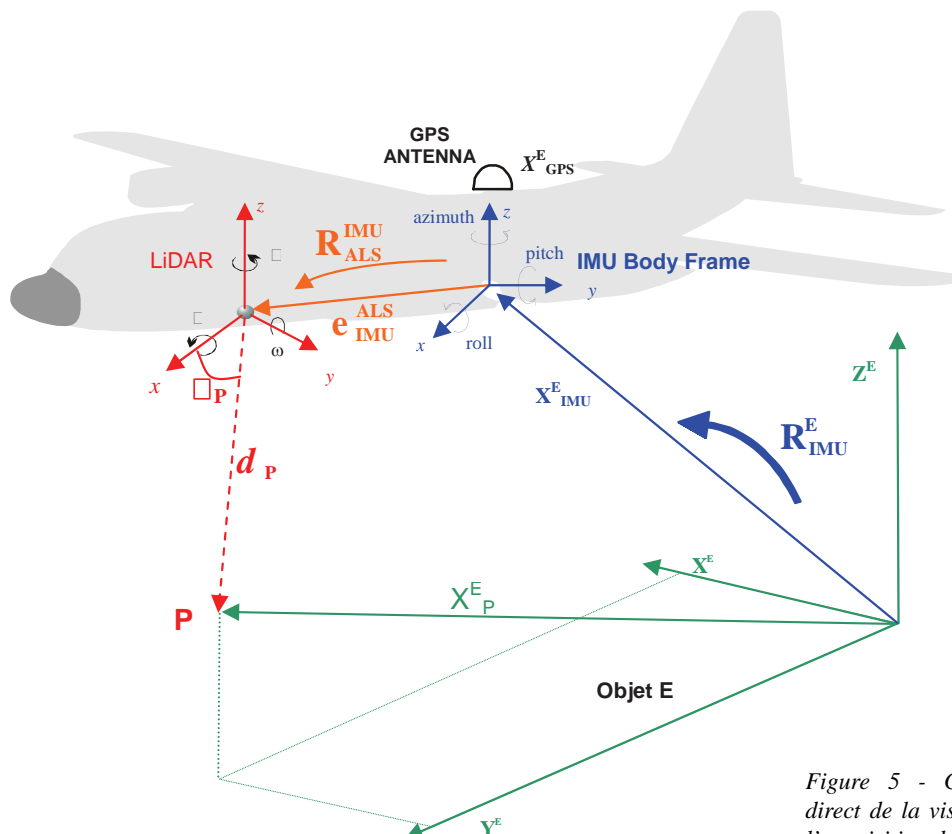


Figure 5 - Géoréférencement direct de la visée laser pendant l'acquisition du point.

La position d'un point au sol P est déterminée selon la relation :

$$X_P^E = X_{IMU}^E + R_{IMU}^E \cdot R_{ALS}^{IMU} \cdot (e_{IMU}^{ALS} + R(\alpha_p) \cdot d_p) \quad (E.4)$$

avec :

X_P^E : Position du point P dans le référentiel objet E (terrain) ;

X_{IMU}^E : Position du centre de navigation de l'IMU dans E (indirectement donné par la position GPS, soit

$$X_{IMU}^E = X_{GPS}^E + R_{IMU}^E \cdot e_{IMU}^{GPS} ;$$

R_{IMU}^E : Matrice de rotation entre Référentiel IMU (*body*) et objet (E) → mesures angulaire de l'IMU : roulis (*roll*), tangage (*pitch*), azimut (*heading*) ;

R_{ALS}^{IMU} : Matrice de montage (*bore sight* + montage) entre IMU et LiDAR (ALS) ;

e_{IMU}^{ALS} : Bras de levier entre IMU et LiDAR ;

e_{IMU}^{GPS} : Bras de levier entre IMU et GPS ;

$R(\alpha_p)$: Vecteur directeur du rayon laser dans le référentiel Laser (fonction de l'angle α mesuré) ;

d_p : Distance mesurée par le Laser dans le système LiDAR.

3 - Les sources d'erreur

Les sources d'erreur dans la chaîne de géoréférencement sont nombreuses (Schenk, 2001) et peuvent être séparées entre sources directes et indirectes. Les sources directes sont relatives aux composantes de référencement du système : position et orientation du système, orientation du miroir et divergence du faisceau laser. Les sources indirectes dépendent de la nature de l'objet mesuré et de l'influence sur la précision. Ces erreurs sont plus difficiles à quantifier mais ont pour origine en majorité : l'angle d'incidence du laser sur la surface (pente), la rugosité et la réflectivité du sol à l'intérieur de l'empreinte du faisceau.

L'erreur de positionnement des points laser au sol peut donc être décomposée selon :

- **la position du système** : la précision de la trajectoire GPS (post-traitement différentiel) varie de 3 à 15 cm en fonction de la distance et la différence d'altitude entre le système et le récepteur GPS de référence, et la géométrie de la constellation des satellites. Cette erreur se traduit par une translation dx , dy , dz , et elle est variable dans le temps du fait de l'évolution de la visibilité et de la géométrie de la constellation. Elle est généralement la composante majeure pour les vols à basse altitude (<200 m sur sol) (Glennie, 2007) ;
- **l'erreur sur la mesure de distance** qui est fonction du rapport signal sur bruit du signal en retour. Ce taux dépendra de la nature du sol et de l'atmosphère traversée. En moyenne, il est donné à ~20-30 mm pour la plupart des LiDAR du marché ;
- **l'erreur sur la détermination de l'orientation du système** (angles IMU, encodeur) : elle se répercute linéairement en fonction de la hauteur de

vol (Figure 6). Cette erreur se caractérise par les relations suivantes :

$$E_{xy} \approx d \cdot e_{imu} \cdot \cos(\alpha_{ALS}) \quad (E.5)$$

$$E_z \approx d \cdot e_{imu} \cdot [\sin \alpha_{ALS} + \cos \alpha_{ALS} \cdot \tan p] \quad (E.6)$$

Sur du terrain plat, on notera que l'erreur planimétrique est la plus importante. Ceci est d'autant plus vrai que la valeur de la précision angulaire de l'azimut est en général trois fois supérieure à celle du roll et du pitch.

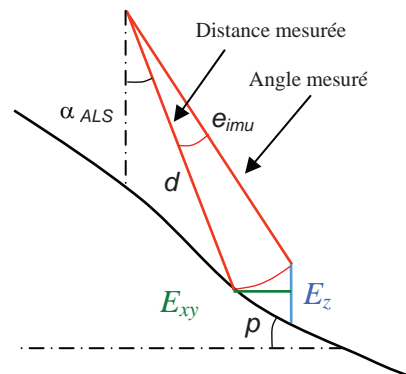


Figure 6 - Influence de l'erreur angulaire sur la position du point au sol.

- **la divergence d du rayon** : la distance mesurée est le résultat de l'intégration de différents retours sur l'empreinte au sol. Plus la tache est grande, plus la mesure de distance sera bruitée ou entachée d'erreur. L'augmentation de la taille et la défor-

mation de l’empreinte lors d’incidence oblique dégrade la précision de mesure. L’hétérogénéité de la réflectivité est aussi un facteur d’erreur si la tache est importante (Figure 7).

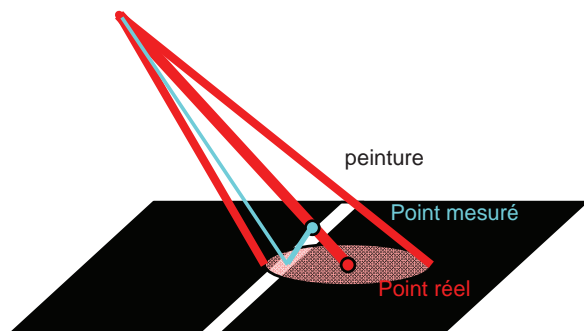


Figure 7 - Exemple de l’influence de la divergence avec une réflectivité hétérogène (liée à des différences de couleurs).

4 - L’étalonnage

L’équation E.4 montre la présence de certains paramètres qui ne sont pas mesurés par des capteurs : les bras de levier et les matrices de montage (rotations résiduelles entre les capteurs dues à l’imperfection de l’assemblage de ces derniers). Ces paramètres doivent être étalonnés une fois le système assemblé et doivent rester impérativement constants durant la totalité de l’acquisition (pas de mouvement relatif entre les cap-

teurs). Cette phase est cruciale, car elle conditionne la précision du géoréférencement des points.

a - Etalonnage des bras de levier

Les bras de levier à déterminer sont le vecteur entre l’antenne GPS et l’IMU et le vecteur entre l’IMU et le LiDAR. Le premier est en général mesuré par méthode terrestre (théodolite) car l’antenne GPS est souvent fixée sur l’aéronef même, et pas directement sur le LiDAR. Ce bras de levier doit dans la mesure du possible être minimisé pour éviter les déformations dues à un manque potentiel de rigidité de l’ensemble.

Pour le second, l’IMU est en général fixé sur le LiDAR, donc il est facile grâce aux plans techniques des fabricants de chaque capteur de connaître le vecteur entre chaque centre de mesure. La précision de mesure de ces leviers est en général de niveau centimétrique.

b - Etalonnage de la matrice de montage (ou « boresight »)

L’étalonnage des rotations résiduelles de montage entre IMU et LiDAR se détermine en vol. La procédure la plus répandue consiste à survoler en croix un ensemble de toits inclinés dans différentes directions (Figure 8). Pour chaque passage, des plans sont extraits du nuage de points des toits puis on ajuste les 3 rotations de montage de manière à faire coïncider les plans (Skaloud *et al.*, 2006).

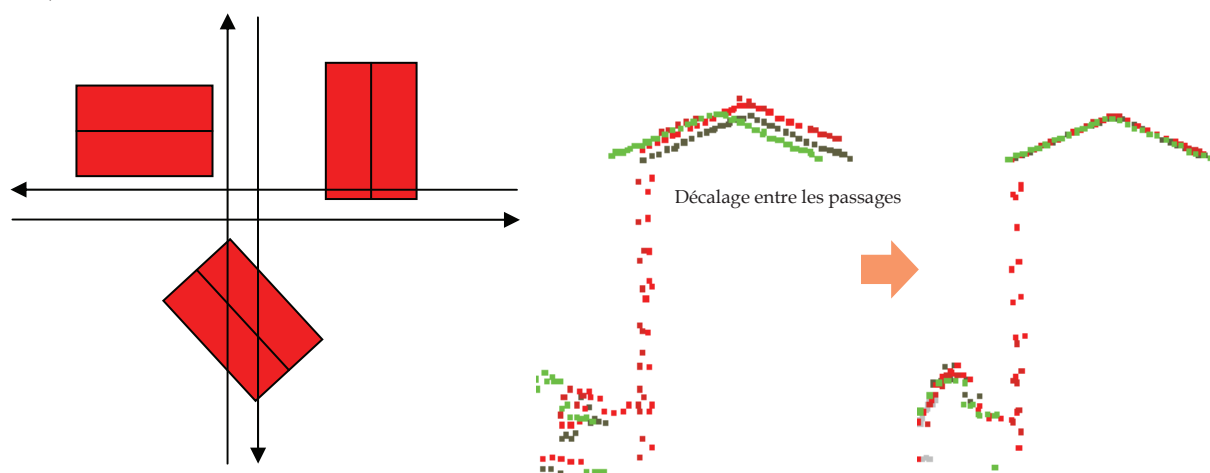


Figure 8 - Disposition des lignes de vol et effet de la correction du boresight sur le nuage de points des différents passages. Les nuages de points rouges, verts et gris correspondent à trois passages sur un des toits. Les rotations de montage sont ajustées jusqu’à ce que les plans coïncident.

II - TECHNOLOGIE ET PERFORMANCE

Aujourd'hui, les constructeurs sont nombreux, et il existe différentes gammes de capteurs pour le relevé aéroporté. On distinguera les systèmes longue portée (> 800 m), des systèmes conçus pour des altitudes de vol inférieures à 1000 m.

1 - Les capteurs

a - LiDAR

Les fabricants de LiDAR offrent quasi tous 2 gammes d'appareils (longue et moyenne distance). De manière analogue aux caméras numériques où on note une certaine course aux mégapixels, le LiDAR à également son argument phare : le PRR. Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques de LiDAR actuels.

b - Le système de géoréférencement direct GPS-IMU

Si les récepteurs GNSS sont équivalents en termes de précision de positionnement (calcul différentiel), le

type d'IMU, lui, va influencer directement la précision du géoréférencement des points au sol par la précision angulaire de l'orientation du capteur. On distingue deux classes d'IMU utilisés pour le géoréférencement direct (Skaloud, 2006) : les IMU de type « tactique » et ceux de type « navigation ». Dans les deux cas, la technologie des accéléromètres et gyroscopes (FOG, *Fiber optic Gyro* ou RLG *Ring laser Gyro*) est similaire. C'est la gamme (biais) des accéléromètres et des gyroscopes qui différencie ces deux classes. Le Tableau 2 présente quelques IMU et leurs caractéristiques.

2 - Performance

La précision de mesure des points va dépendre de l'IMU utilisé, de la hauteur de vol, de l'angle d'ouverture du faisceau, et de la précision de la trajectoire GPS (position). La Figure 9 illustre la précision de mesure théorique d'un point au sol en fonction de l'altitude de vol, du type d'IMU et de l'angle d'ouverture (nadir, extrémité de la fauchée) pour une précision de position GPS typique (~2-5 cm sur chaque axe) et sur un sol supposé plat et de réflectivité uniforme.

LiDAR	Max. PRR [kHz]	λ [nm]	FOV [°]	Distance [m]	Divergence [mrad]	Applications
Leica ALS60	200 MPiA	1064	75°	200-5000	0,22	Haute altitude, grande surface
Optech Pegasus	400 MPiA	1064	65°	300-2500	0,20	Haute altitude, grande surface
Riegl LMS680i	400 MPiA	1500	60°	300-2000	0,25	Haute altitude, grande surface
Riegl VQ580	390	1064	60°	50-800	0,25	Moyenne altitude et surface, corridor
Riegl LMS240i	10	905	60°	50-300	2,7	Basse altitude, petite surface, corridor

Tableau 1 - Principales caractéristiques de quelques LiDAR du marché. MPiA : Multi-pulse in the Air.

IMU	Biais gyroscope	Biais accéléromètre (1)	Type (2)	Précision d'orientation Roll-pitch / Heading (3)
iMAR FSAS	0,75 °/h	1 mg	T	0,01° / 0,03°
iMAR iNAV-RQH	0,002 °/h	30 mg	N	0,0015°/0,006°
iXSEA Airins	0,005 °/h	20 mg	N	0,0025° / 0,005°
Litton LN200	0,5 °/h	0,3 mg	T	0,008° / 0,025°
Applanix POS-AV510	0,1 °/h	0,3 mg	N	0,005° / 0,008°
(1) après Post-traitement GPS-IMU ; (2) T : tactique, N : navigation ; (3) mg : $1 \text{ mg} \sim 9,81 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$				

Tableau 2 - Caractéristiques principales d'IMU du marché.

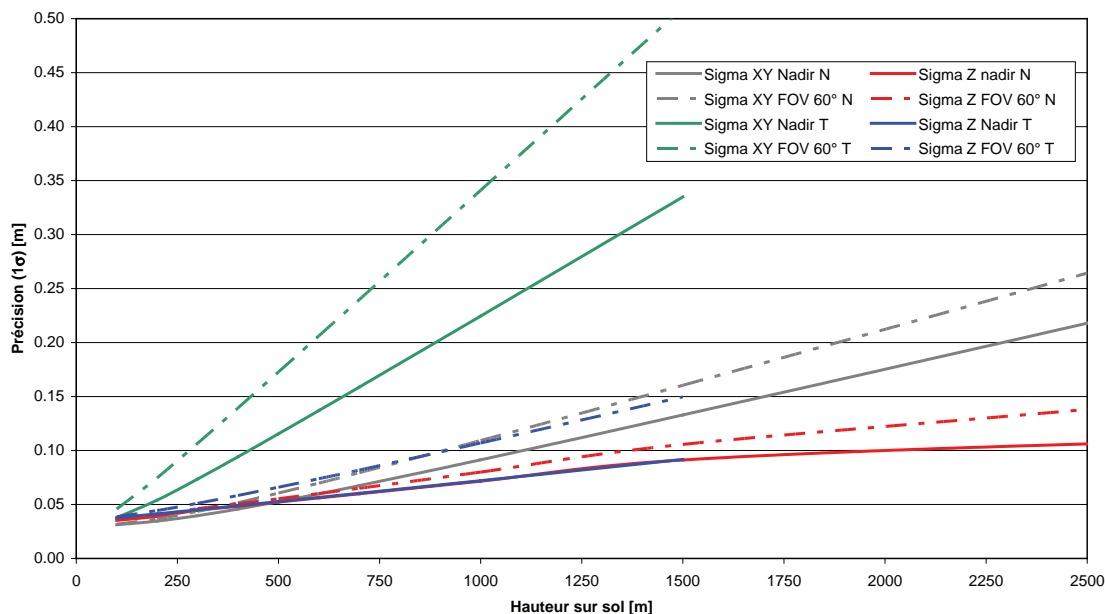


Figure 9 - Précision des points au niveau du sol en fonction de l'altitude de vol, du type d'IMU et du champ d'ouverture (FOV) du LiDAR sur sol plat.

III - MÉTHODOLOGIE DE L'ACQUISITION DES DONNÉES

La planification d'une acquisition LiDAR aéroportée nécessite de répondre aux questions essentielles sur le produit final escompté :

- **la précision requise (altimétrique et planimétrique)** : pour du terrain peu accidenté, la séparation altimétrie et planimétrie a un sens. Pour du terrain accidenté, les deux étant liés, il est préférable de fixer une précision globale tridimensionnelle. Il est également important de prendre en compte le type de surface que l'on va couvrir lorsque l'on fixe la précision. En effet, une grande précision (~5 cm) peut s'avérer utile pour des surfaces relativement lisses ou compactes, mais elle est superflue pour des terrains à grande rugosité ;
- **la densité de points nominale nécessaire** : à l'heure où les LiDAR peuvent générer des densités très importantes, il faut savoir rester réaliste et avoir conscience qu'une densité nominale de plus de 5-10 points/m² est en général inutile pour des relevés en milieu naturel. Hormis pour les zones très boisées ou pour des besoins spécifiques, ~5 points/m² sont généralement suffisants pour la plupart des applications de modélisation (trajectographie, hydrologie, aménagements...) ;
- **le niveau de détail requis** : cet aspect est très souvent confondu avec la précision. Il s'agit du plus petit objet ou détail du terrain que l'on veut restituer à terme. Requérir un niveau de détail de moins de 10 cm est inutile en terrain naturel, car la rugosité du terrain lui est souvent supérieure. En terrain

construit, cette valeur peut varier de 2 à 15 cm selon l'objet de la saisie. Ce paramètre est important, car il conditionne le mode de traitement du nuage de points et surtout le volume des données finales (niveau de dé-densification) ;

- **la complexité du relief** : cet aspect détermine le mode d'acquisition le plus adapté : classique (visée nadirale) ou oblique. On pourra définir un relief comme complexe lorsque l'on trouve des pentes d'orientation variable avec des inclinaisons supérieures à 30°.

1 - La problématique du relief accidenté

Les reliefs accidentés tels ceux de l'arc alpin présentent des surfaces à forte déclivité et des falaises avec des parties surplombantes. Effectuer une acquisition LiDAR avec une visée conventionnelle « nadirale » dans de fortes pentes présente plusieurs inconvénients : la densité et la précision sont hétérogènes et certaines zones (surplombs) sont absentes du nuage de points (Vallet, 2009). Comme pour la photogrammétrie, il est donc préférable d'effectuer une acquisition en ayant l'axe de visée perpendiculaire au terrain (Figure 10).

Pour effectuer une saisie oblique, l'emploi de l'hélicoptère est obligatoire, car il permet de suivre le relief et de voler à des altitudes très basses sur sol. Le Tableau 3 décrit les critères à prendre en considération pour le choix de l'aéronef en vue de l'acquisition.

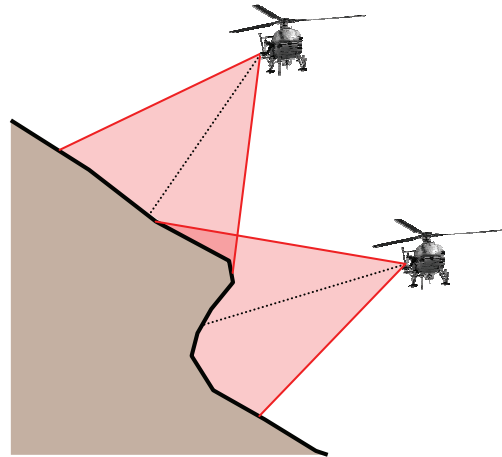
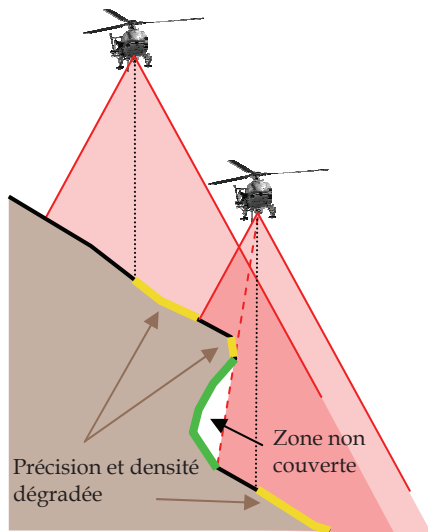


Figure 10 - Acquisition nadirale (gauche) vs oblique (droite) de pentes ou de falaises. La rotation du LiDAR perpendiculaire à la pente permet d'obtenir une précision et une densité homogène. Cela permet également de couvrir les zones surplombantes sans zone d'ombre.

	Hélicoptère	Avion
Densité [pt/m ²]	1 - 200	0,1 - 10
Précision [m]	0,03 - 0,15	0,1 - 0,5
Type de terrain	Accidenté, plaine, corridor	Plaine ou montagne (vol haute altitude)
Visée	Nadir, Oblique	Nadir
Surface [km ²]	0,01 ~ 30 Corridor (larg. < 1000 m)	> 20

Tableau 3 - Critères de choix pour l'aéronef, en fonction de la densité, de la précision et du terrain.

2 - Le traitement des données

a - La trajectoire et la génération du nuage de points

Le calcul de la trajectoire est l'étape cruciale du géoréférencement direct car la précision du nuage de points en dépend principalement. La séquence de traitement des données est illustrée par la Figure 11. Pour des vols de haute précision basse altitude (<500 m), le calcul de la trajectoire est prépondérant. Pour ne pas avoir de mauvaise surprise, il convient de planifier à

l'avance le vol en fonction de la visibilité et géométrie des constellations GPS/GLONASS. Ceci d'autant plus que l'on évolue dans un relief accidenté où les masques peuvent être importants. Un minimum de 7 satellites GPS est recommandé (6 strict minimum) avec un indicateur DOP (*Dilution of precision*) inférieur à 3-4.

Selon le type d'IMU employé, la durée de perte du signal GPS acceptable (moins de 5 satellites), sans une dégradation trop importante de la précision de positionnement, est de ~20 secondes pour un IMU de type tactique et ~100 secondes pour un IMU de type navigation. Au delà, le biais des accéléromètres est trop important pour estimer précisément la position du capteur sans recalage de la part du GPS.

b - Les données LiDAR

Le traitement des données LiDAR représente une tâche importante de la chaîne de production. Tout d'abord, le filtrage consiste à classer les points du nuage afin d'en retirer les informations pertinentes quant au type d'objet : sol, bâtiments, végétation ou autres. Les informations à disposition pour filtrer les points sont, outre la position 3D de chaque point, le type d'écho, l'intensité et l'amplitude de retour. La

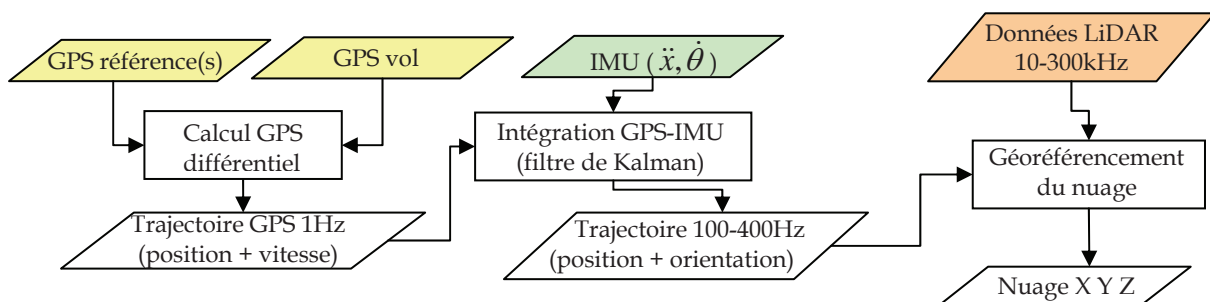


Figure 11 - Schéma synoptique des phases du géoréférencement du nuage de points.

majorité des algorithmes de filtrage sont basés sur des considérations géométriques (voisinage, triangulation, pente...) (documentation Terrasolid, 2011).

Les logiciels de filtrage de points laser permettent d'automatiser une bonne partie du traitement mais un contrôle et une édition manuelle restent indispensables. Le niveau de détail recherché va déterminer l'énergie à mettre dans cette phase d'édition. Cette édition sera d'autant plus importante que la topographie est tourmentée car les routines automatiques sont

souvent mises en défaut lors de discontinuités de terrain (falaises, murs, surplombs, végétation en paroi). La Figure 12 illustre la séquence générale de filtrage entre le nuage brut et le produit final.

Lorsque le filtrage est terminé, il faut ensuite alléger le nuage pour le rendre utilisable par les applications en aval. Différents algorithmes permettent de réduire le nombre de points en fonction d'un niveau de détail toléré (*keypoint*, *thinning*) (documentation Terrasolid, 2011).

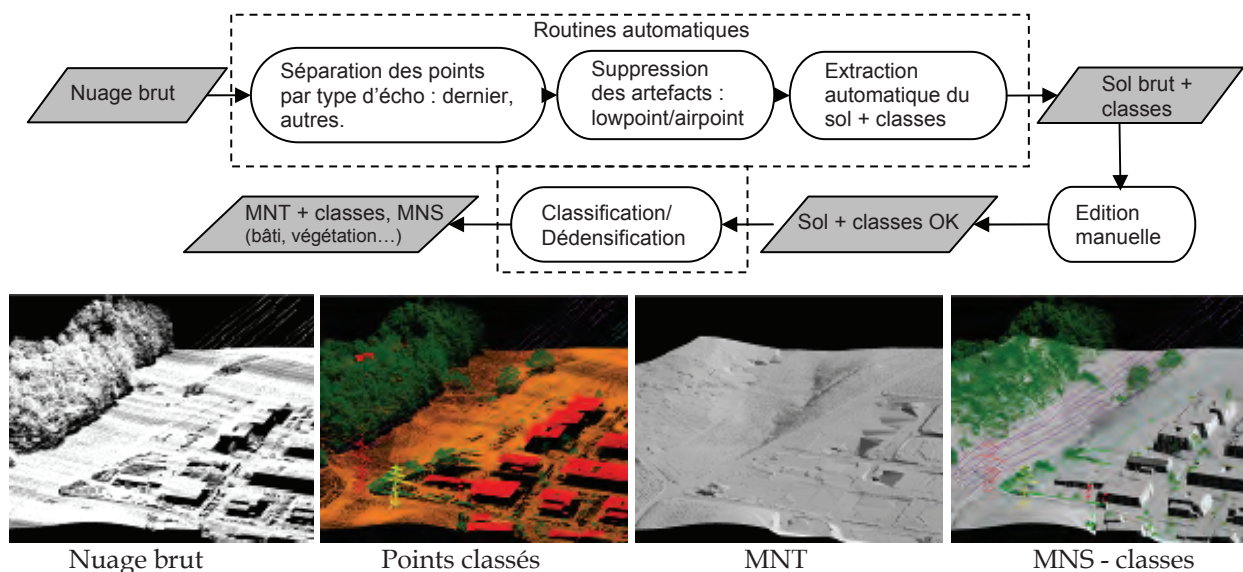


Figure 12 - Séquence générale de filtrage du nuage brut au produit typique MNT-MNS.

CONCLUSION

La lasergrammétrie aéroportée est une technique très performante pour acquérir des données 3D de qualité de notre environnement. La haute fréquence de mesure du LiDAR permet d'obtenir des modèles numériques de terrain/surface (MNT/MNS) de grande densité (de 1 à 200 points/m²) et ce même sous couvert végétal. La technique du géoréférencement direct permet d'obtenir, selon la hauteur de vol sur sol, la qualité l'IMU et la constellation GPS, un nuage de point avec une précision dans une gamme de ~3 cm à 30 cm. Afin de réduire les sources d'erreur dans le nuage de points, une attention particulière doit être portée sur l'étalonnage du système, en minimisant autant que possible les bras de levier entre les capteurs (GPS-IMU-LiDAR) et en déterminant selon une procédure *ad hoc* les rotations résiduelles entre l'IMU et le LiDAR.

L'emploi de cette technique lors de la réalisation d'une acquisition nécessite d'identifier clairement ses

besoins en termes de précision, de densité, de niveau de détail et de produit final souhaité. Sur cette base, selon le type de terrain, le choix de l'aéronef (avion ou hélicoptère), du type d'acquisition (verticale ou oblique) et du niveau de filtrage, peuvent être fait.

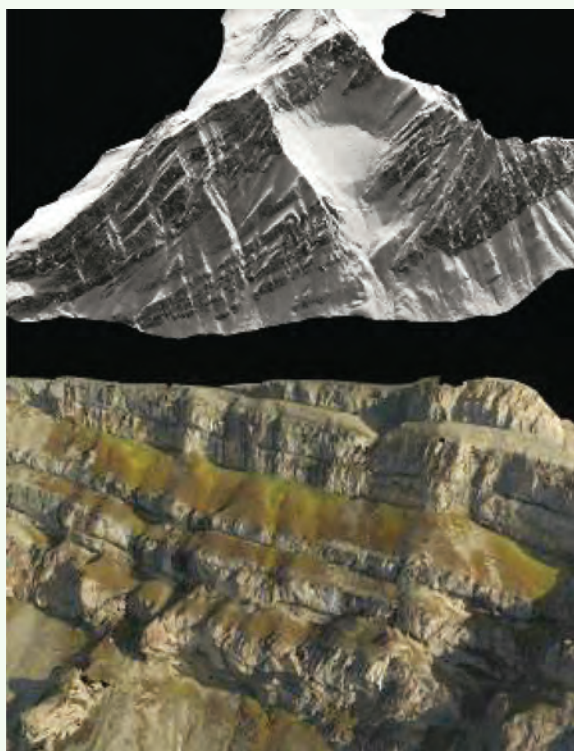
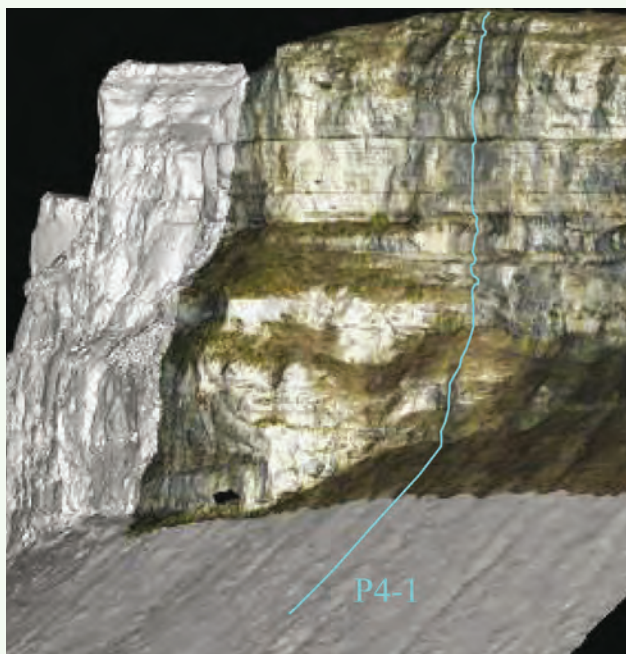
Finalement, le LiDAR aéroporté est probablement la technique la plus adaptée dans le domaine des risques naturels ou de l'aménagement de la montagne pour obtenir des MNT à haut niveau de détail. Mais dans tous les cas, l'image reste un complément indispensable à l'interprétation de la couverture du sol. De par sa résolution supérieure au LiDAR et son information radiométrique, elle complète à merveille les nuages de points sous forme d'orthophoto ou de texturage des modèles LiDAR pour affiner l'identification de certains objets. Quelques exemples du potentiel de cette technologie sont illustrés dans l'encadré annexe.

Exemples d'acquisition aéroportée en milieu alpin avec un système héliporté

Les différents exemples qui suivent ont été acquis avec le système héliporté Helimap System, opéré manuellement en mode vertical ou oblique (Vallet et Skaloud, 2005) et illustrent différentes utilisations dans les domaines tels que les risques naturels (avalanche, chute de bloc, éboulement), l'hydraulique fluviale, la glaciologie, la géomorphologie ou la géologie.

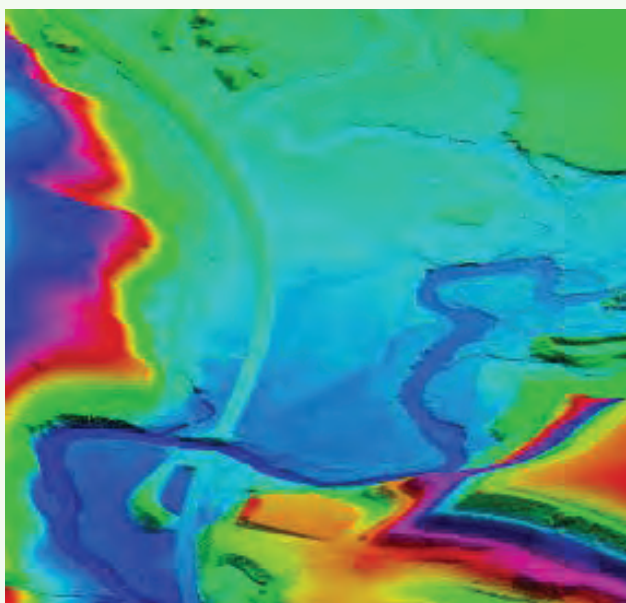
Lors de ces acquisitions, des images numériques à haute résolution furent simultanément capturées avec un recouvrement stéréoscopique. L'image est très complémentaire du nuage laser car elle apporte une densité d'information supérieure (plusieurs centaines de pixels par m²). Elle peut être utilisée pour mesurer des détails très fins, des structures linéaires ou des éléments thématiques (photo-interprétation). La combinaison simultanée des deux techniques est une réelle plus value dans ce cas.

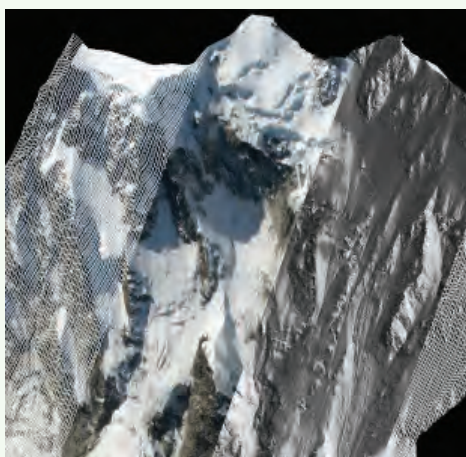
► *Modèle 3D avec zones de surplomb, pour l'étude trajectographique de chute de blocs à Tenay (Ain). Relevé de falaise en mode oblique avec texturage du MNT. Dans ce cas, le filtrage demande beaucoup de temps car la végétation en falaise doit être épurée manuellement. La falaise fait environ 120 m de haut. Le trait bleu représente un des axes de simulation de trajectoire.*



► *Modèle 3D texturé des parois de Mediumfjellet (Spiztberg), hauteur ~600 m. L'identification et le géoréférencement précis des différentes strates et plis, combinés à des mesures géophysiques, permettent de caler et valider un modèle structural 3D (Buckley et al. 2008).*

► *Modèle 3D de zones fluviales pour modélisation d'écoulement et inondations (Venoge, Suisse, taille de la zone représentée : ~200 ha).*

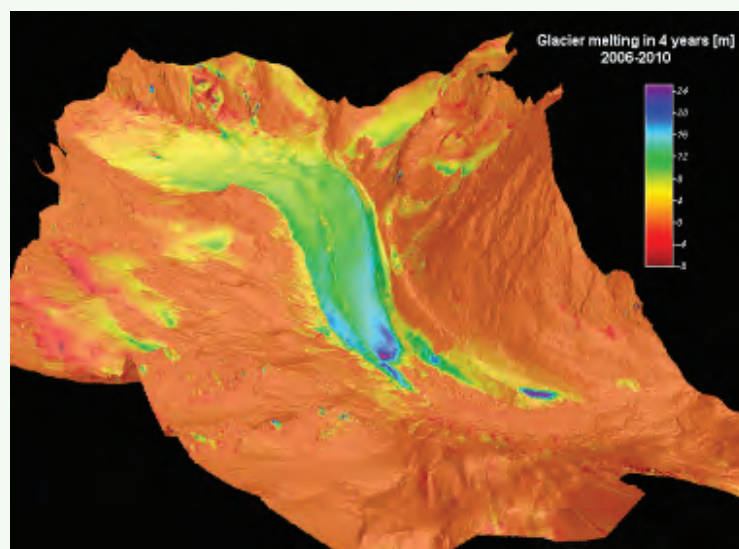




▲ Modèle 3D de la face Est du Mont Rose (Italie) pour le suivi d'éboulement de grande ampleur (Fischer et al. 2011). La face fait ~2000 m de dénivellation sur 1 km de large.

▼ Suivi du bassin versant du haut glacier d'Arolla, ~2000 ha (Suisse) entre 2006 et 2010. Relevé combiné oblique et nadiral de ~2000 ha pour extraire le bilan volumique des zones glaciaires sur le bassin versant. L'orthophoto de chaque épisode permet d'apprécier les changements de surface glaciaire (couverture de moraine, couleur de la glace, chose peu visible sur le LiDAR).

Lors de plusieurs saisies épisodiques, il est extrêmement important d'utiliser une référence cartographique stable dans le temps pour géoréférencer les vols, afin d'éviter les erreurs systématiques. Aujourd'hui, grâce aux réseaux GPS permanents (RGP, EUREF, CORS), il est possible de se rattacher à chaque époque au réseau national du site investi.



BIBLIOGRAPHIE

- BUCKLEY S.J., VALLET J., WHEELER W., BRAATHEN A., 2008. Oblique helicopter-based Laser scanning for digital terrain modelling and visualisation of geological outcrops. Beijing 2008. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, B4, 493-498.
- GLENNIE C.L., 2007. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, 1, 3, 147-157.
- FISCHER L., EISENBEISS H., KÄÄB A., HUGGEL C., HAEBERLI W., 2011. Monitoring topographic changes in a periglacial high-mountain face using high-resolution DTMs, Monte Rosa East Face, Italian Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, DOI: 10.1002/ppp.717
- SERGENT C., POUATCH E., SUDUL M., BOURDELLES B., LEROUX C., CACHEIR H., 1995. Etude expérimentale des paramètres optiques de la neige. Réflectance directionnelle hémisphérique. Symposium International ANENA. Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanches, Chamonix, 30 mai-3 juin 1995, 291-298.
- SCHENK T., 2001. Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners. The Ohio State University, Columbus, USA. *Technical Notes in Photogrammetry*, 19, p. 46.
- SKALOUD J., 1999. Optimizing, Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS, Ph.D. *Dissertation*. UCGE Report 20126, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- SKALOUD J., 2006. Reliability of Direct Georeferencing Phase 1: An Overview of the Current Approaches and Possibilities: checking and Improving of Digital Terrain Models/Reliability of Direct Georeferencing. Technical report, 2006. *EuroSDR Official Publication*, 51, 143-168.
- SKALOUD J., LICHTI D. 2006. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61, 1, 47-59.
- VALLET J., 2009. Cartographie hélicoptérée avec un système LiDAR-Photogrammétrique portable à la main : Expérience pratique en montagne, Analyse des performances et de la phase de calibration. Colloque technique laser pour l'étude des environnements naturels et urbains, SFPT, Le Mans, février 2009.
- VALLET J., SKALOUD J., 2005. HELIMAP: Digital imagery/Lidar handheld airborne mapping system for natural hazard monitoring. In *Proceedings of the 6th Geomatic Week*, 2005.
- VOSSelman G., MAAS H.G. (Eds.), 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, 320 p.
- TERRASOLID, 2011. Terrascan Manual. http://www.terrasolid.fi/en/users_guide/terrascan_users_guide

LA PHOTOGRAMMETRIE

PRINCIPES GÉNÉRAUX ET TERMINOLOGIE

PHOTOGRAMMETRY: GENERAL PRINCIPLES AND TERMINOLOGY

YVES EGELS

*Ecole nationale des sciences géographiques, Département imagerie aérienne et spatiale,
Avenue Blaise Pascal, 77455 Marne la Vallée Cedex 2, France.*

Contact : yves.egels@free.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est de présenter les éléments théoriques essentiels de la photogrammétrie. Après une présentation des principes de cette technique bénéficiant de plus d'un siècle de recul méthodologique, les mesures et leurs corrections font l'objet d'un développement. Le géoréférencement des images est alors décrit : orientation, compensation, redressement. Enfin l'exploitation des images et la production des MNT et orthophotos constitue l'aboutissement de la chaîne opératoire mise en œuvre.

MOTS-CLÉS : PHOTOGRAMMÉTRIE, ICONOMÉTRIE, IMAGE, COLINÉARITÉ.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the essential theoretical elements of photogrammetry. The technical principles, based on a century of development, are first described. The measures and their corrections are then explained and developed. Two main results of the treatment pipeline are finally proposed: DEM and orthophotographies.

KEYWORDS: PHOTOGRAMMETRY, ICONOMETRY, IMAGE, COLLINEARITY.

INTRODUCTION

La photogrammétrie est utilisée depuis plus d'un siècle comme instrument de mesure géométrique, essentiellement dans le domaine de la cartographie, où elle est la base de la quasi-totalité des cartes topographiques du monde. Pendant tout le vingtième siècle, les technologies ont relativement peu évolué. Elles sont restées très onéreuses et confinées dans des grands organismes, instituts géographiques civils ou militaires, ou sociétés privées de topographie. Depuis l'an 2000, trois facteurs ont complètement modifié les possibilités d'usage de la photogrammétrie :

- le plus important a été la généralisation de l'image numérique de bonne qualité, à des coûts toujours plus bas. Le handicap principal des techniques ana-

logiques était en effet le support des images, plaques de verre ou film de grand format, qui rendait indispensable un système de visualisation optico-mécanique complexe et délicat. Même l'apparition des reconstituteurs numériques dans les années 80 n'a guère amélioré cette situation ;

- l'augmentation constante de la puissance de calcul des ordinateurs, qui permet de réaliser des opérations complexes en des temps très courts sur des grandes quantités de données ;
- la généralisation dans le domaine universitaire de logiciels libres a mis à la disposition de tout chercheur des outils extrêmement performants.

I - GÉNÉRALITÉS

1 - Principe

La photogrammétrie, mieux nommée à son invention iconométrie, permet la mesure géométrique d'objets dont on possède des images. Ce terme est un peu vague et nécessite une définition précise dans le cadre de la photogrammétrie : une image est une transformation géométrique de l'espace R^3 dans l'espace R^2 (fonction image). Peu importe la réalisation physique de cette transformation, très souvent photographique, mais aussi radar, radiographique, microscopique, ou par un dispositif à balayage. On remarquera que le lidar ou scanner laser n'entrent pas dans cette définition, car la mesure est directement tridimensionnelle, et, même s'ils sont souvent mis en œuvre par les mêmes corps de métier, les techniques de traitement n'ont rien de commun.

Bien entendu, la fonction image ne peut pas être directement inversée, l'inverse d'un point étant sauf exception une ligne. Il est donc nécessaire d'ajouter une autre information pour permettre la localisation à

partir de l'image. Deux grandes catégories de méthodes sont alors utilisées (Figure 1) :

- si l'on ajoute une information de forme sur l'objet, une seule image peut suffire. Un objet peut être plan (une façade par exemple) et on parle alors de redressement, mais aussi on peut supposer connu un modèle de l'objet (Modèle numérique de terrain MNT) et l'on produira alors une orthophoto ;
- lorsqu'une telle information n'est pas disponible, on peut utiliser plusieurs images qui couvrent l'objet, et qui permettent ainsi de le localiser par intersection. C'est la base de la stéréophotogrammétrie.

2 - La mesure, le modèle et les résidus

D'une manière générale, un processus de relevé topographique est, pour une part, la réalisation d'une mesure, l'autre part étant la compréhension de l'objet à relever. Cette mesure est complexe, et peut faire appel à des outils divers : le mètre, l'appareil photo, le tachéo-



Figure 1 - Orthophoto et stéréophotogrammétrie : à gauche la localisation est impossible ; au centre la localisation est obtenue par combinaison d'une image et d'une information sur la forme de l'objet ; à droite la localisation se fait par intersection des deux droites issues de deux images.

mètre, le scanner laser, le GPS... Chacun de ces outils fournit des mesures unitaires partielles et de nature et de *précisions* diverses : le mètre fournit des distances entre points, le tachéomètre des angles et des distances, la photo des coordonnées des pixels. Le traitement géométrique des mesures a pour but de transformer ces différentes données en un résultat final correspondant aux besoins du commanditaire.

Pour effectuer cette transformation, les anciens utilisaient souvent la règle et le compas, maintenant cette tâche est confiée à des logiciels, qui fonctionnent globalement tous de la même façon : la mesure unitaire est modélisée par une équation la reliant aux coordonnées des points et aux paramètres de l'instrument de mesure. Par exemple, avec un niveau, la dénivellée est reliée aux coordonnées des deux extrémités par l'équation simple $D_n = Z_1 - Z_2$. Pour d'autres instruments de mesure, les équations peuvent être beaucoup plus compliquées : par exemple, pour la photographie, l'équation donnera les coordonnées de l'image d'un point connaissant la position de la caméra, son orientation, et les caractéristiques de l'objectif que l'on appelle en général *paramètres*. Chaque type d'instrument de mesure possède son propre modèle mathématique, qui représente son fonctionnement par le calcul numérique.

Réaliser une mesure revient alors à trouver le *meilleur jeu* de coordonnées et de paramètres, qui soit en accord avec toutes les mesures unitaires qui ont été enregistrées. C'est la base de la méthode appelée « solution par moindres carrés ». Bien entendu, la définition de « meilleur jeu » doit prendre en compte les différents types d'instrument de mesures et leurs précisions propre ; par exemple, on mesure à 2 cm près avec un décimètre ruban, à 1 pixel près l'image d'une cible sur une photo, à 50 cm près une touffe d'herbe, à 3 mm près une distance au tachéomètre... Ces différences de précision sont prises en compte dans le calcul par la *pondération*, qui donne la qualité estimée de chaque mesure.

Cette méthode fournit deux résultats : d'une part les coordonnées et paramètres cherchés, mais aussi une estimation de la qualité de ces valeurs, à condition qu'il y ait un nombre de mesures supérieur au minimum nécessaire (mesures *surabondantes*). L'évaluation de la précision est tirée de l'examen des *résidus*, qui correspondent à la différence entre chaque mesure unitaire et la valeur calculée par le modèle, qui tient compte de l'ensemble des mesures effectuées. La moyenne de tous ces résidus, rapportés à la pondération (*résidus normalisés*) donne un estimateur global (s_0) de la précision du modèle. Si les pondérations sont correctes, cet estimateur doit être proche de 1 (ce qui signifie que la précision obtenue est proche de la précision recherchée).

La connaissance de la précision obtenue a un double but :

- s'assurer que la méthode utilisée pour le relevé est adaptée au besoin. Si la précision obtenue est inférieure à la demande, il faudra ajouter des mesures

bien placées, ou utiliser des instruments plus précis. Si elle est supérieure la demande, la rentabilité économique du chantier sera mauvaise, il faudra en tenir compte dans les prochains projets ;

- vérifier qu'il n'y a pas de faute de mesure. Si les mesures ne sont pas surabondantes, il est impossible de s'assurer qu'il n'y a pas de faute. Plus la surabondance est grande, plus la détection des fautes est facile. Une mesure non contrôlée n'est pas une mesure.

Il n'est pas évident de séparer les fautes de mesure de la précision obtenue car les possibilités d'erreur sont nombreuses : une erreur de numéro de point, la focale d'un autre objectif, une image mal tournée... Si la surabondance est suffisante, il est possible de donner une règle efficace :

- les gros résidus normalisés isolés supérieurs à 3 ou 4 fois la valeur s_0 correspondent à des fautes. Les fautes doivent être comprises, pour ne pas les refaire la fois suivante, et corrigées ;
- les gros résidus très groupés, correspondent à une estimation réelle de la précision. S'ils sont anormalement forts, soit la précision estimée des mesures est surestimée, soit certains paramètres généraux du modèle mathématique sont faux (par exemple la distorsion de l'optique pour un calcul de photogrammétrie).

3 - Les points homologues

La plupart des opérations photogrammétriques nécessitent l'identification de points homologues, c'est-à-dire des images d'un même point de l'objet sur différentes photographies. Les solutions technologiques à ce problème sont de plusieurs types :

- on peut décrire le point : par un texte ou un dessin, ou le rendre identifiable par la pose d'une cible. On peut classer dans la même catégorie le détecteur SIFT et ses variantes, qui décrivent mathématiquement l'environnement radiométrique des points, et ramène la recherche de points homologues à un calcul de distance dans l'espace des descripteurs. Ces méthodes fonctionnent point par point et sont habituellement très précises, mais ne permettent évidemment pas la mesure complète d'un objet en tous points ;
- on peut mesurer la ressemblance radiométrique des points, soit par un opérateur humain (vision stéréoscopique), soit de façon algorithmique. La visualisation stéréoscopique informatique est maintenant très à la mode, avec le développement du cinéma 3D, ce qui rend beaucoup plus accessibles les applications de restitution photogrammétrique, qui nécessitaient précédemment des matériels spécialisés. La détermination algorithmique de points homologues se fait pratiquement toujours par l'examen d'un coefficient de ressemblance, souvent le

coefficient de corrélation linéaire entre des extraits d'image. Malheureusement, cette méthode est intrinsèquement peu fiable car la fonction de corrélation comporte plusieurs maxima dont un seul correspond

au point homologue, et doit être complétée par des règles de cohérence additionnelles, par exemple en imposant une pente maximum.

II - LA FONCTION IMAGE (ÉQUATION DE COLINÉARITÉ)

Dans le cas d'une image photographique, l'image correspond en première approximation, à une perspective centrale, à laquelle la physique réelle impose d'apporter un certain nombre de corrections.

1 - Perspective

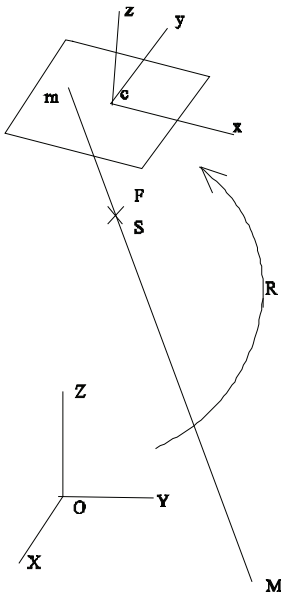


Figure 2 - Notation conventionnelle utilisée pour la mise en place de la fonction image.

La perspective géométrique est définie comme l'intersection de la droite joignant le point objet au centre de l'objectif avec le plan du capteur (Figure 2). Si l'on note K le vecteur unitaire sur l'axe Z (Figure 2), on peut exprimer les coordonnées m de l'image en fonction des coordonnées M du point objet, de la position S et de l'orientation R du capteur, du vecteur focal F par la formule suivante :

$$m = F - \frac{KFR(M - S)}{FR(M - S)} \quad (\text{éq. 1})$$

Qui peut être développée en :

$$\text{et } \begin{cases} x = x_c - p \frac{R_1 \cdot (M - S)}{R_3 \cdot (M - S)} \\ y = y_c - p \frac{R_2 \cdot (M - S)}{R_3 \cdot (M - S)} \end{cases} \quad (\text{éq. 2})$$

2 - Corrections

En réalité, la perspective n'est qu'une approximation de la réalité physique. Plusieurs phénomènes sont à prendre en considération, leur importance étant fonction du domaine d'application envisagé.

a - Système de coordonnées

Tout d'abord, la formule précédente s'applique dans un espace euclidien (repéré par trois axes orthonormés), qui n'est pas habituellement celui des cartographes, qui sont habitués à travailler en projection. Bien entendu, la correction la plus importante est altimétrique, suivant la formule approximative bien connue de l'équation 3. La correction est ainsi de 7,7 cm à 1 kilomètre.

$$\Delta h = \frac{D^2}{13} \quad (\text{éq. 3})$$

La solution la plus rigoureuse consiste à transformer les coordonnées cartographiques dans le système euclidien local, en utilisant si possible les formules géodésiques rigoureuses, ou éventuellement une formule approchée valable dans le domaine d'étude.

b - Distorsion optique

Les caméras photogrammétriques aériennes professionnelles ont une distorsion quasi nulle (par construction pour les caméras argentiques, par calcul pour les caméras numériques). Ce n'est pas le cas des appareils photographiques usuels, de plus en plus utilisés pour des applications photogrammétriques légères. La distorsion est la fonction reliant l'orientation du rayon lumineux émergent à celle du rayon incident.

Dans la mesure où l'optique est correctement construite (dioptries de révolution bien centrés), on peut souvent se contenter d'une correction radiale modélisée par un polynôme impair centré sur l'intersection de l'axe optique et du capteur (éq. 4). Le point principal de symétrie n'est confondu avec le point principal d'autocollimation que si l'axe optique est perpendiculaire au capteur.

$$dr = ar^2 + br^5 + cr^7 \quad (\text{éq. 4})$$

La distorsion des optiques courantes (surtout grand angulaires) atteint souvent la centaines de pixels ; sa connaissance conditionne grandement la qualité des mesures qui pourront être faites. L'étalonnage permet

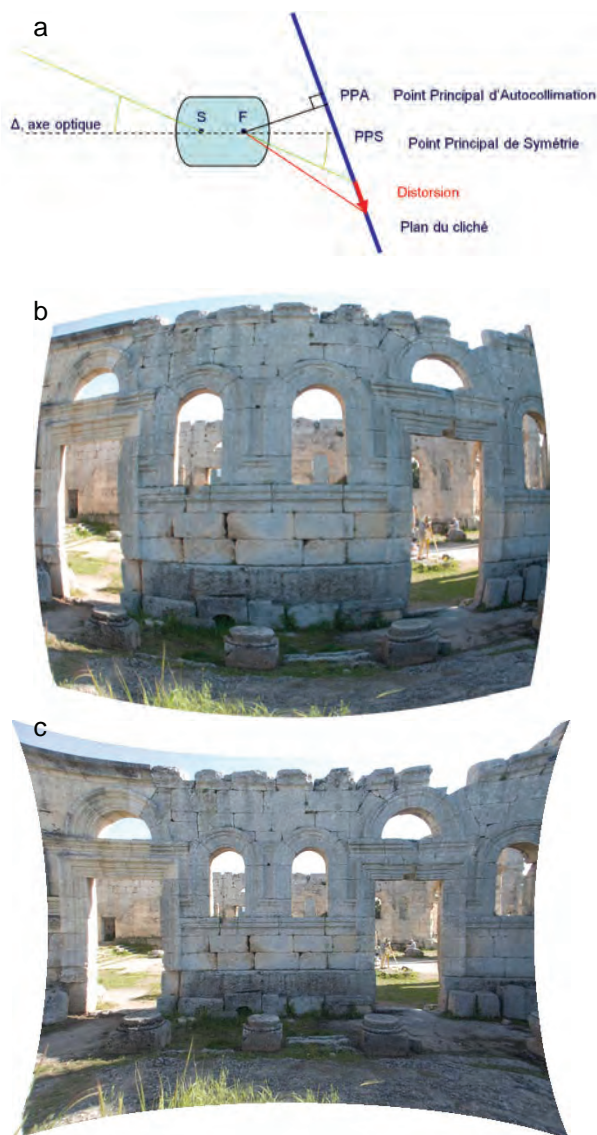


Figure 3 - a) principe de la distorsion optique ; b) distorsion en barillet ; c) distorsion en coussinet.

de ramener les résidus de distorsion à une fraction de pixel (0,15 à 0,25). Si cette modélisation polynomiale est insuffisante, il peut être nécessaire d'adopter une correction par interpolation dans une grille, notamment lorsque des défauts de centrage des lentilles produisent une distorsion tangentielle sensible.

III - LE GÉORÉFÉRENCEMENT DES IMAGES

Quelle que soit l'utilisation des images dans un but de mesure (stéréorestitution, redressement, orthophoto, corrélation, texturation de nuages 3D), il est nécessaire de reconstituer les conditions géométriques dans lesquelles ces images ont été acquises. Plus précisément, il s'agit de déterminer la position et l'orientation de la caméra à chaque photo, et éventuellement les paramètres internes de la caméra (point principal et distor-

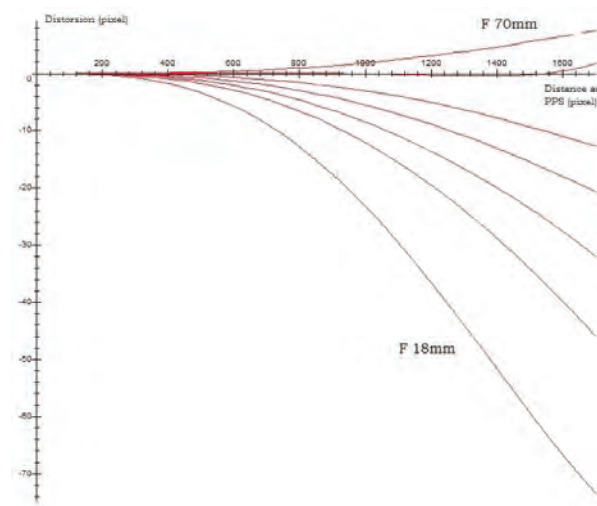


Figure 4 - Distorsion d'un objectif Minolta 18-70.

c - Correction atmosphérique

En raison des variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère, les rayons ne se propagent pas en ligne droite. L'indice n varie essentiellement en fonction de l'altitude du capteur suivant la loi :

$$n = 1 + 278.10^{-6} e^{(-105.10^{-6} h)} \quad (\text{éq. 5})$$

La conséquence est une correction altimétrique y fonction de l'altitude h et de l'angle θ des rayons lumineux avec la verticale.

$$y = \left(\frac{1}{\cos^2 \Theta} \right) \left[\frac{n_s - n_M}{105.10^{-6}} + (h_s - h_M)(n_c - 1) \right] \quad (\text{éq. 6})$$

où n_s , n_M et n_c sont respectivement les indices de réfraction au niveau du sol, de l'avion, et dans la cabine (dans le cas d'un avion pressurisé). Cette correction est souvent faible, elle vaut par exemple 45 cm pour un avion volant à 5 000 mètres et un angle de 45°

d - Corrections diverses

Dans certains cas, d'autres corrections peuvent s'avérer nécessaires, par exemple la déformation du support lorsque l'on cherche à exploiter des images anciennes pour des études diachroniques, ou la réfraction de l'eau pour des mesures sous-marines.

sion). Cette opération constitue le géoréférencement des images, et revient à déterminer toutes les formules d'image des photographies.

Dans certains cas, il est possible d'obtenir des données directement lors de la prise de vue elle-même : c'est le cas en photographie aérienne, où la position de la caméra peut être obtenue par GPS, et l'orientation par une centrale à inertie, dont sont équipées

maintenant la plupart des caméras aériennes (mais pas toujours suffisamment précises pour ce but). Dans le domaine de la photogrammétrie terrestre, ces pratiques restent possibles, au moins partiellement (mesure du point de station par topométrie, nivellement de l'axe optique avec un niveau à bulle). Mais elles alourdissent considérablement les opérations de terrain, et en diminuent sensiblement la productivité ; elles ne sont en conséquence pas d'un usage courant.

Le géoréférencement des images peut être réalisé à la demande pour deux images, dans le cas de la stéréorestitution d'un couple, mais il est plus économique de traiter simultanément l'ensemble des images du chantier. On utilise alors une méthode d'aérottriangulation, dont les résultats peuvent être employés pour la fabrication des produits finaux.

1 - Principe de calcul

De façon générale, on a recours à une reconstruction des paramètres de prise de vues par le calcul, à partir d'une part de mesures de coordonnées de points dans les images (mesures image), et d'autre part d'informations externes de dimensions, positions, et orientations (mesures d'appui). Ce calcul, qui est une application particulière de la méthode décrite dans le paragraphe « La mesure », porte dans ce cas le nom de « compensation par faisceaux ». Pour appliquer cette méthode générale, il est nécessaire de traduire chaque mesure (image ou appui) en une équation mathématique reliant la mesure aux paramètres du problème. Il suffit alors d'utiliser des outils mathématiques adaptés (moindres carrés) pour calculer les paramètres les mieux adaptés aux mesures :

- pour les mesures images, cette équation est l'équation de colinéarité, déjà vue ci-dessus (eq. 1) ;
- pour les points d'appui, les équations sont simples : les coordonnées du point M doivent être égales aux coordonnées P mesurées par la topographie ($M = P$).

Comme il est précisé dans le paragraphe sur la mesure, les types de mesures ont des précisions très différentes, une fraction de pixel pour les mesures images, quelques centimètres pour les points d'appui par exemple. Il convient donc de choisir une pondération adéquate.

2 - Phases du calcul

Si le principe général est simple, la mise en œuvre est nettement plus complexe. En effet, les équations de colinéarité ne sont pas linéaires. On qualifie de linéaire un phénomène dans lequel une augmentation des paramètres produit une augmentation proportionnelle du résultat. Si la vitesse d'une voiture est multipliée par 2, la distance parcourue en un certain temps sera doublée.

Par contre, si on tourne de 180° , on repart en arrière, si on tourne du double, le résultat est nul, on continue tout droit : les rotations ne sont pas linéaires. Hors l'équation de colinéarité fait intervenir des rotations.

Malheureusement, les méthodes classiques de résolution des systèmes d'équations utilisables pour calculer l'aérottriangulation fonctionnent uniquement avec des systèmes linéaires. Pour pallier cette difficulté, on résout les équations par approximations successives, à partir d'une valeur approchée raisonnable, c'est-à-dire suffisamment proche de la réalité pour que les approximations puissent converger vers la bonne valeur. Si les itérations ne convergent pas en quelques itérations (moins d'une dizaine, en général 2 ou 3), cela signifie que les valeurs approchées sont trop éloignées de la réalité. La cause en est presque toujours une faute de mesure non détectée dans la phase de calcul approché.

Il existe de nombreuses méthodes de calcul approché. A titre d'exemple, dans *Redresseur* on dispose d'une boîte à outils que l'on peut combiner, comme on peut calculer un réseau topométrique en combinant des intersections, des rayonnements, des relèvements, etc. Pour faciliter les calculs, il est intéressant d'organiser les images en bandes, chaque bande étant composée d'images se succédant avec recouvrement stéréoscopique. Ces outils sont les suivants :

a - Orientation relative

On utilise deux images de deux stations différentes ayant des points homologues (au moins 6, de préférence une douzaine). On laisse l'image gauche fixe, et on calcule la position de l'image droite telle que tous les rayons homologues se coupent (dans ce cas la parallaxe verticale est nulle). Les équations utilisées sont les équations de coplanéité, indiquant que les deux sommets et les rayons homologues sont coplanaires, avec comme valeurs approchées des axes parallèles perpendiculaires à la base (en cas de besoin, il est possible d'introduire des axes convergents). On obtient un couple, ensemble des points vus sur les deux images, avec des coordonnées dans le repère de l'image gauche.

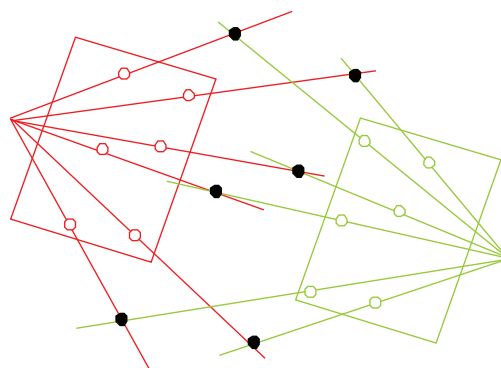


Figure 5 - Orientation relative.

b - Enchaînement de groupes

Un groupe est un ensemble d'images ayant déjà été reliées, par exemple un couple, ou plusieurs couples déjà enchaînés. On prend deux groupes ayant au minimum 3 points communs, non alignés (et éventuellement une image commune, si les groupes appartiennent à la même bande). On calcule le changement de repère qui passe le second groupe dans le repère du premier. Le modèle mathématique est la similitude 3D, avec blocage de la rotation et de la translation s'il y a une image commune. On obtient un groupe plus grand.

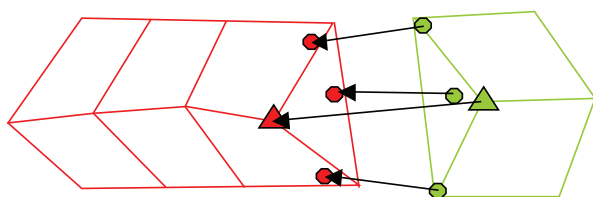


Figure 6 - Enchaînement de deux groupes (d'un couple vert à trois couples déjà enchaînés en rouge). Cercles : points de liaison au sol. Triangles : Sommet commun.

c - Orientation absolue

Si un groupe contient un nombre suffisant de points connus sur le terrain (3 minimum, non alignés), on peut calculer le changement de repère qui passe le second groupe dans le repère terrain. Le modèle mathématique est la similitude 3D.

d - Compensation par faisceaux

Les groupes orientés en absolu peuvent être compensés pour obtenir les paramètres de prise de vue définitifs. Le modèle mathématique utilise les équations de colinéarité et d'appui, tous les paramètres étant estimés simultanément. Il est possible de considérer les paramètres d'étalonnage des caméras comme des inconnues, et de les déterminer en même temps que le géoréférencement des images (auto-étalonnage). Cette

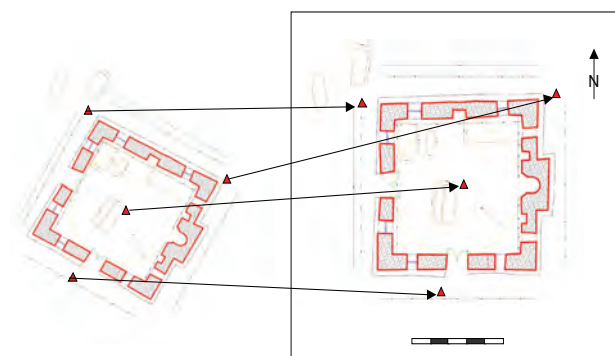


Figure 7 - Orientation absolue.

méthode, qui permet de se passer d'un étalonnage préalable des caméras, nécessite une bonne répartition des points de mesure et d'une configuration favorable de la prise de vues. Elle est très sensible aux fautes de mesure.

e - Cas du redressement

Si le sujet du relevé est plan, l'équation de colinéarité peut se simplifier, en se transformant en une homographie. La connaissance du centrage et de la focale de la caméra n'est plus indispensable, ainsi que le recouvrement stéréoscopique. Par contre, tous les points (appui et liaison) doivent être coplanaires, et le géoréférencement n'est pas valable hors du plan considéré. Cette méthode est bien adaptée à la réalisation d'assemblage de photos redressées.

f - Mesures

La qualité d'une aérotriangulation dépend beaucoup de la bonne répartition des points mesurés et des points d'appui. Les points de liaison les plus efficaces sont les points visibles sur le plus grand nombre possible d'images, et les points placés sur les bords des images. Dans une prise de vues régulière, de façade par exemple, 4 ou 5 points à chaque nadir donnent de bons résultats. Ils doivent être mesurés sur toutes les images qui le voient. Le nombre de points d'appui doit être équivalent au nombre d'images. Il faut placer des points d'appui aux bords des zones à relever. Les mesures peuvent être manuelles, ou obtenues par un algorithme de détection automatique de points homologues.

La phase de mesure manuelle est assez longue, et nécessite beaucoup d'attention, et il est inévitable que des erreurs s'y glissent. Les plus grosses risquent de rendre le calcul impossible, surtout si elles faussent trop les valeurs approchées de la compensation (dans ce cas le calcul ne converge pas, et les résultats sont totalement inexploitable). Il est donc important de les détecter le plus tôt possible, à chacune des phases des calculs. Comme cela a été vu dans le chapitre sur la mesure, la qualité des résultats et les fautes éventuelles apparaissent à l'examen des résidus de la compensation.

Les développements récents du traitement d'images permettent l'automatisation de la recherche des points de liaison, en utilisant les propriétés de points caractéristiques (détecteur SIFT par exemple). Le nombre de points de liaison obtenus de cette façon peut être très grand en un temps très court (plusieurs centaines par images en quelques minutes). Mais le nombre de fautes (souvent très grosses) est élevé (20 à 30 % des points), et il est indispensable de filtrer automatiquement les mesures au cours du calcul, par exemple avec un algorithme de type RANSAC.



Figure 8 - Points de liaison.

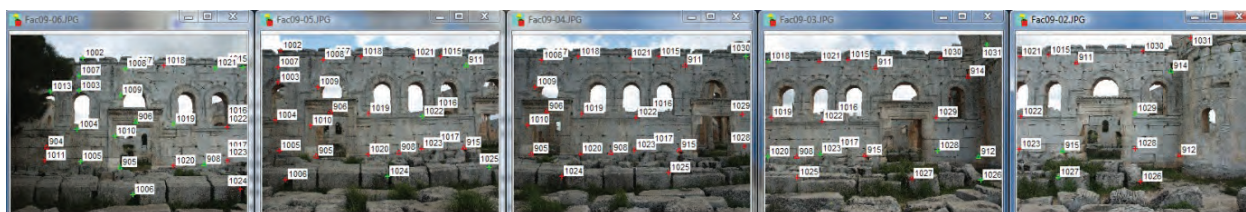


Figure 9 - Points d'appui.



Figure 10 - Points de liaison automatiques. Les points en jaune sont faux.

IV - EXPLOITATION DES IMAGES

Une fois le géoréférencement réalisé, les images peuvent être utilisées à des fins de mesures. Plusieurs types de produits sont alors disponibles, en fonction de l'application :

1 - Etalonnage d'une caméra

Le calcul de géoréférencement peut être un produit en lui-même, par exemple pour fournir la trajectoire d'un mobile, ou l'orientation d'un objet auquel on fixe une caméra (un bon exemple étant le bras d'arrimage de la navette spatiale). L'application la plus répandue reste néanmoins l'étalonnage d'une caméra. Les données de départ sont alors les coordonnées images d'un certain nombre de points vus sur plusieurs images, éventuellement connus en coordonnées terrain. Le polygone et/

ou les conditions de prise de vues (convergence) sont choisis de façon à donner une profondeur importante à l'objet. Le calcul de géoréférencement peut alors fournir les valeurs précises de la focale et de la distorsion. Ce calcul peut être réalisé simultanément au calcul de géoréférencement d'un chantier (autoétalonnage), mais ce n'est pas toujours une solution rentable en pratique.

2 - Stéréorestitution

On peut utiliser un couple d'images et numériser manuellement des points et des lignes choisis par un opérateur, en leur attribuant des codes correspondant à des attributs sémantiques généraux (route, bâtiment, courbe de niveau) ou spécifiques à une application métier (ligne de faille, limite de bloc...). Il s'agit d'une restitution point par point en mode vecteur, qui permet une interprétation directe en 3D de la scène. Lors de la restitution photogrammétrique, la formule d'image est appliquée en temps réel lors du déplacement du curseur 3D (appelé aussi ballonnet).

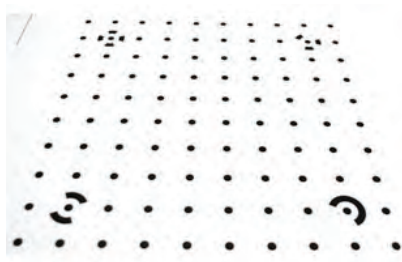


Figure 11 - Mire (PhotoModeler) et polygones d'étalonnage ENSG.

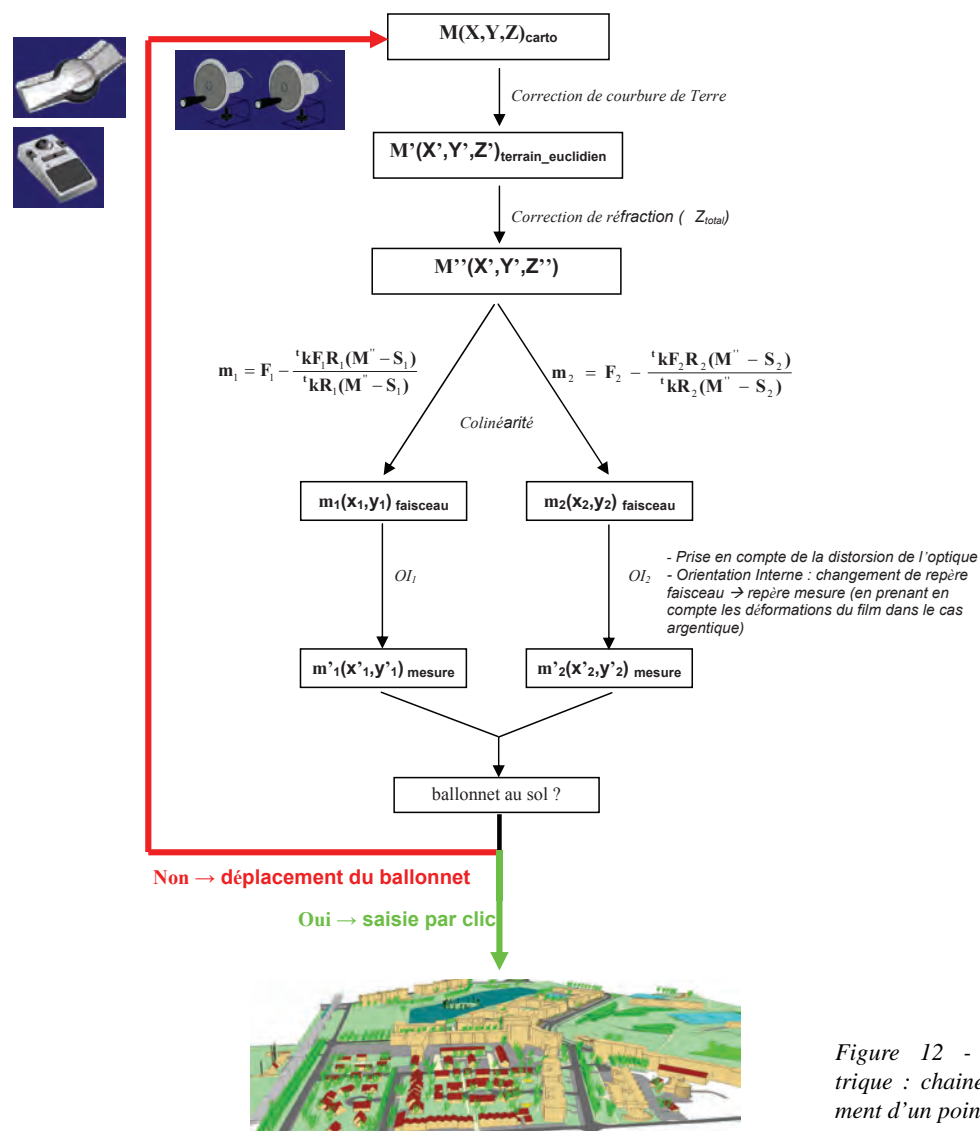


Figure 12 - Restitution photogrammétrique : chaîne de calcul lors de l'ajustement d'un point au sol.

3 - MNT et orthophoto

On peut aussi déterminer automatiquement un modèle dense de l'objet par corrélation, et utiliser ce modèle soit en tant que tel (pour une étude morphologique, calcul de pentes, de volumes, d'exposition...) soit pour rectifier les photographies et obtenir ainsi une orthophoto, assemblage d'images rectifiées en projection cartographique. La boucle de calcul de l'orthophoto est la suivante : chaque pixel de l'orthophoto à calculer reçoit une altitude (Figure 13.1) par l'intermédiaire du modèle numérique. Ce point est projeté par les formules d'image sur les différentes photographies du chantier (Figure 13.2). Les radiométries y sont alors prélevées et combinées (par mélange, par choix d'une image préférentielle, ...)(Figure 13.5). La radiométrie résultante sert alors à colorier le pixel de départ (Figure 13.6)

Dans le cas d'un objet tridimensionnel complexe (orthophoto urbaine vraie, et surtout orthophoto de prise de vues terrestre) il est nécessaire d'ajouter à

ce processus des phases d'élimination des parties cachées, à la fois sur chaque photographie du chantier, et sur l'orthophoto résultante, ce qui complique considérablement l'opération.

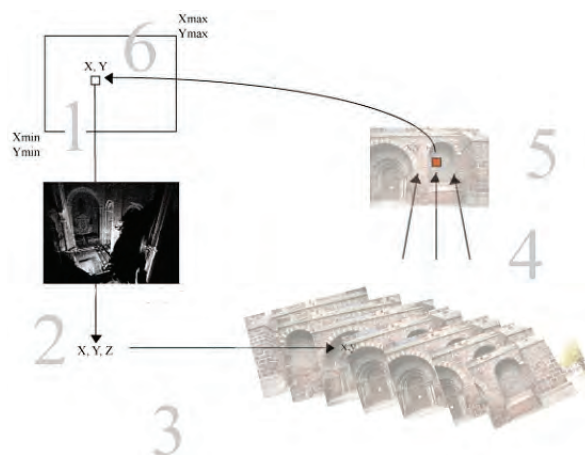


Figure 13 - Processus de calcul d'une orthophoto.

CONCLUSION

Nous avons détaillé succinctement dans cet article les étapes fondamentales permettant une exploitation photogrammétrique d'images avec recouvrement stéréoscopique. Les principes utilisés se fondent sur la relation géométrique entre le terrain et les images de ce terrain. Cette relation se caractérise par une formule

de projection dont les paramètres définissent l'orientation du modèle photogrammétrique. La restitution photogrammétrique constitue la phase d'exploitation de ce modèle. Elle aboutit à la détermination des coordonnées de points terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- BONNEVAL H., 1972. Photogrammétrie générale. Collection scientifique de l'IGN ; t.1 : Enregistrement photographique des gerbes perspectives, 232 p. ; t.2 : Restitution : méthodes et appareils, 361 p. ; t.3 : Levés topographiques par photogrammétrie aérienne, 309 p. ; t.4 : Méthodes et appareils simplifiés, applications non topographiques, 312 p.
- CONSEIL INTERNATIONAL DE LA LANGUE FRANÇAISE CIFI, 1997. Terminologie de télédétection et photogrammétrie : Français - Anglais
- EGELS Y., KASSER M., 2001. Photogrammétrie numérique. Hermes Science publications, 379 p.
- GREVE C., 1996. Digital photogrammetry : an addendum to the manual of photogrammetry. American Society for Photogrammetry and remote Sensing, 247 p.
- INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE, 1995. Second course in digital photogrammetry. 2 vol. 2000 p.
- KASSER M., EGELS Y., 2002. Digital photogrammetry. Taylor & Francis, 351 p.
- KRAUS K., STEWARDSON P., 1993. Photogrammétrie. Vol. 1 : Fundamentals and standart process, 397 p., Vol. 2 : Advanced methods and applications, 466 p.
- LINDER W., 2003. Digital photogrammetry: theory and applications. 189 p.
- MIKHAIL E.-M., BETHEL J., MCGLONE J.C., 2001. Introduction to modern photogrammetry. Wiley, 478 p.
- SCHENKT T., 1999. Digital photogrammetry. Terrascience, 428 p.
- WOLF P.R., DEWITT B.A., 2000. Elements of photogrammetry with applications in GIS. McGraw-Hill, 608 p.

On trouvera là une bibliographie commentée :

http://www.ensg.eu/IMG/pdf/bibliographie_ref_photogrammetrie.pdf

ÉVOLUTIONS RÉCENTES EN PHOTOGRAMMÉTRIE ET MODÉLISATION 3D PAR PHOTO DES MILIEUX NATURELS

RECENT EVOLUTION IN PHOTOGRAMMETRY AND 3D MODELISATION OF NATURAL SPACES.

MARC PIERROT DESEILLIGNY, ISABELLE CLERY

IGN/MATIS, 2 Avenue Pasteur, 94160 Saint Mandé Cedex, France.

Contact : marc.pierrot-deseilligny@ign.fr

RÉSUMÉ

En quelques années, on est passé d'une photogrammétrie à but métrologique avec des techniques de modélisation basées sur l'intelligence du restituteur à des techniques capable de calculer un modèle 3D de manière 100% automatique à partir de « masses » d'images. Les raisons de ces progrès spectaculaires sont le passage à la photo numérique, la fusion des approches de photogrammétrie et vision par ordinateur et l'augmentation continue de la puissance de calcul des ordinateurs ; grâce à ces évolutions dans beaucoup d'applications, la photogrammétrie est (re)devenue une alternative au scanner laser. Parmi les solutions logicielles, libres et gratuites, proposées aujourd'hui, celle de l'Institut Géographique National, se distingue en étant plus spécifiquement destinées aux scientifiques ; moyennant l'apprentissage de protocoles simples pour la prise de vues, ces outils permettent de réaliser automatiquement des modélisations 3D denses sur une gamme de scènes très variées. Des résultats de modélisation des milieux naturels sont présentés sur différents types d'acquisition : aérienne, terrestre extérieur, terrestre intérieur, aquatique.

MOTS-CLÉS : PHOTOGRAMMÉTRIE, VISION PAR ORDINATEUR, AUTOMATISATION, LOGICIELS LIBRES, MODÉLISATION 3D DES MILIEUX NATURELS.

ABSTRACT

In few years, 3D photo modelisation has evolved from manual photogrammetry for metrological purpose to techniques allowing fully automatic 3D modelization out of masses of images. Reasons of this tremendous progress includes : transformation from analogical to numerical photography, fusion of photogrammetry and computer vision approaches, and continuous growing of computation power; due to these evolutions, in many domains, photogrammetry is back again an alternative to laser scanning. Among free open source solution proposed today, IGN'solution is more specifically dedicated to scientist; when used with the right protocols, it can produce dense 3D models on a large type of scenes. Results on 3D modelisation of natural spaces are shown with different way of acquisition: aerial acquisition, indoor and outdoor terrestrial acquisition, acquisitions in aquatic environment.

KEYWORDS: PHOTOGRAMMETRY, COMPUTER VISION, AUTOMATISATION, OPEN SOURCE, 3D SURVEYING OF NATURAL SPACES.

INTRODUCTION

Il est devenu courant, et presque banal, pour beaucoup de disciplines techniques, d'entendre dire qu'elles ont connu une révolution avec le passage à l'ère numérique et le développement d'internet. Pourtant, concernant l'évolution récente de la modélisation 3D à partir de photos, le qualificatif de rupture significative, nous semble loin d'être complètement galvaudé si l'on regarde dix ans en arrière et que l'on compare les usages de la photogrammétrie par les quelques professionnels qui connaissaient cette technique en l'an 2000 avec les services de modélisation 3D offerts au grand public en 2011.

En photogrammétrie « classique » l'exploitation des images requiert qu'elles aient été acquises selon un protocole rigide : image acquise de manière sub-verticale avec une structure de bandes pour la photogrammétrie aérienne, existence de nombreuses cibles relevées par des méthodes topométriques pour la photogrammétrie terrestre. Y-a-t-il alors encore quelque chose de commun entre, d'une part, les suites logicielles proposées par les éditeurs « classiques » de photogrammétrie, telles qu'elles existaient déjà à la fin du millénaire, coûtant parfois plusieurs dizaines de milliers d'euros, nécessitant un apprentissage long et ne

permettant d'exploiter que des photos acquises par des caméras métriques selon ces protocoles très contraignants et, d'autre part, des services gratuits (Photofly, 2011 ; Photosynth, 2011 ; Arc3D 2010...) permettant à n'importe quel internaute, après avoir visionné une vidéo d'apprentissage de quelques minutes, de réaliser un nuage de point 3D de sa maison à partir de quelques dizaines de photos acquises par un appareil compact, ou encore avec un service tel que (Google Sketchup, 2010) permettant de saisir un modèle structuré et sémantisé ?

L'apparition de ces nouveaux services posent plusieurs questions : Est-ce les mêmes techniques fondamentales qui sont derrière les chaînes traditionnelles et les produits récents que nous avons mentionnés ? Ou au contraire, y-a-t-il eu une vraie révolution technique ? Ces produits tout automatiques offrent-ils les mêmes services en termes de précision que les logiciels classiques de photogrammétrie ? S'ils n'offrent pas ces précisions, est-ce dû à une lacune technique intrinsèque à leur conception ou est-ce essentiellement la conséquence d'une absence de demande identifiée ; dans ce cas cette faiblesse pourrait-elle être facilement comblée si cette demande se structure ?

I - LES ÉVOLUTIONS RÉCENTES DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

1 - La dernière «décennie photogrammétrique» : évolution ou révolution ?

Fondamentalement et mathématiquement, il n'y a pas eu de rupture en « photogrammétrie et vision par ordinateur » depuis une dizaine d'année ; pour une caméra matricielle, la formule d'image reliant un point terrain à ses coordonnées dans la photographie est connue et utilisée depuis plusieurs siècles : cette formule est applicable tant pour les tous derniers appareils numériques que pour les premières chambres noires. L'inversion de cette formule constitue le cœur de la photogrammétrie inventée par Aymé Laussedat il y a 150 ans ; les outils mathématiques nécessaires à l'orientation des images, qu'ils s'appellent matrice essentielle, relèvement dans l'espace, compensation de faisceau... sont connus et répandus depuis de nombreuses décennies.

Cependant l'assemblage de ces briques algorithmiques anciennes dans des « pipelines logiciels » cohérents capables de générer de manière totalement automatique des modèles 3D d'extérieurs à partir d'un simple ensemble d'images (Figure 1) est un phénomène récent, les premiers démonstrateurs cohérents ne remontent pas tellement avant 2007 (Furukawa, 2009),

la plupart des travaux antérieurs de modélisation d'objets « vraiment 3D » s'étant attaqués à la reconstruction de petits objets en utilisant des méthodes spécifiques telles que l'extraction de silhouette (Furukawa, 2006) difficilement transposable en dehors du laboratoire. Dans la suite de cette partie, nous allons décrire les principaux éléments contextuels et avancées théoriques qui ont permis cette évolution significative.

2 - La photo numérique

Le remplacement de la photo analogique par la photo numérique est incontestablement un des éléments majeurs qui a permis l'apparition de solutions de modélisation 3D totalement automatisées à partir de photo. En effet, si en matière de photographie artistique ou familiale, on peut concevoir une certaine nostalgie de l'ère analogique, en revanche, dans un domaine technique comme la photogrammétrie, la photographie numérique arrivée à son stade de développement actuel ne présente que des avantages et ceux-ci sont tout à fait conséquents. De manière un peu crue, on pourrait dire, en terme économique, qu'on a gagné à la fois sur la qualité et sur le prix : on obtient plus d'information et moins de bruit pour beaucoup moins d'efforts. Mais, si

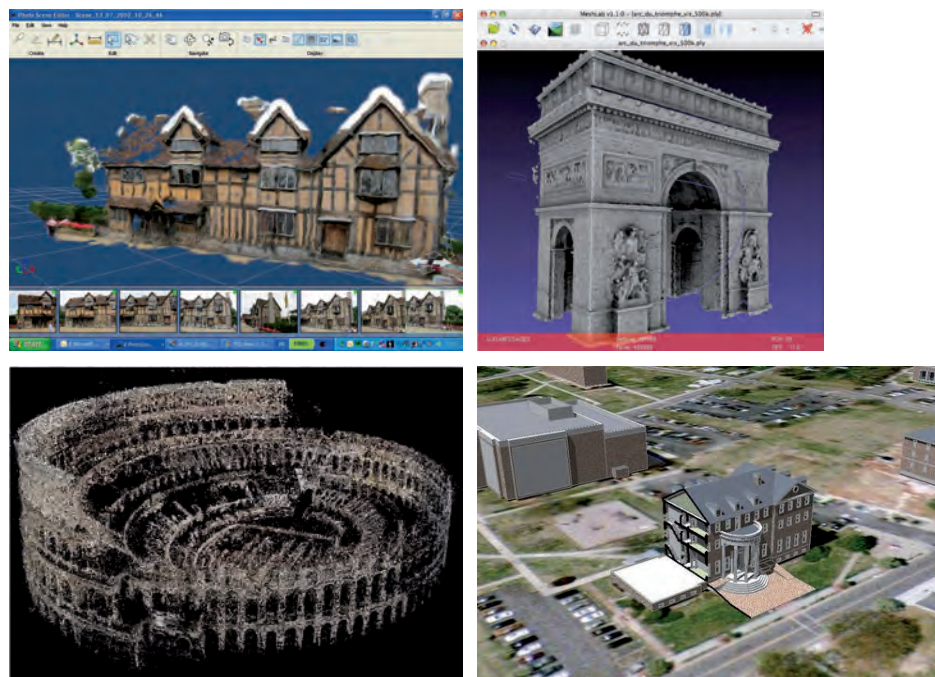


Figure 1 - Quelques exemples de modélisation 3D réalisées à partir de photos en utilisant des services ou logiciels gratuits : service Photofly (autodesk), service Arc3D et logiciels Bundler-PMVS. En bas à droite : modélisation avec google sketch-up.

la photo numérique a induit un changement fondamental c'est d'abord parce que, l'acquisition d'une photo supplémentaire devenant quasiment gratuite (en tous cas complètement marginal dans la chaîne de valeur), elle permet l'émergence de nouveaux protocoles d'acquisition où c'est la masse des photos qui apporte la redondance d'information permettant des traitements fiables, précis et automatisés (Figure 3). Evidemment, le traitement des volumes d'information résultants n'aurait pas été possible, du moins pas à ce rythme, si, parallèlement à l'émergence de la photo numérique, la puissance de calcul et stockage des ordinateurs n'avait pas continué de croître selon la loi de Moore (selon laquelle puissance de calcul et capacité de stockage sont multipliées par deux tous les deux ans).

Du point de vue de la qualité des informations récoltées, un apport assez évident de la photo numérique (Kasser, 2001) est l'amélioration du rapport signal à bruit dans le produit obtenu ; pour des caméras aériennes pour lesquelles il existe de nombreuses

études, le gain en SNR (Signal to Noise Ratio) entre les caméras numériques et les photos argentiques numérisées est estimé à un facteur 10 ; nous estimons que le gain est du même ordre entre des photos en format brut (*i.e.* non altérées par une compression dégradante telle que jpeg) prises par appareils reflex et des photos argentiques numérisées sur des scanners de moyenne gamme. En appariement d'images (corrélation automatique) cette amélioration de la qualité du signal se traduit directement en termes de fiabilité des appariements, notamment sur les zones à faible contraste ; elle a permis aussi de mesurer les parallaxes (ou leur équivalent en multi-corrélation) avec une précision sub-pixellaire, typiquement de un demi à un dixième de pixels suivant les contextes (Figure 2).

Dans la chaîne de traitement photogramétrique classique, un autre apport essentiel du numérique, surtout pour les applications légères, est de supprimer l'étape de calcul de l'orientation du film par rapport au scanner. Evidemment, si l'on veut conserver la pré-

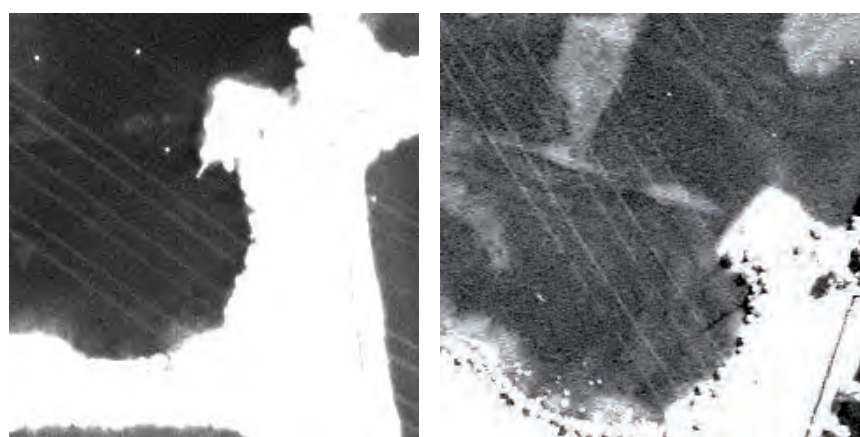


Figure 2 - Comparaison, sur une même zone, entre les premières images numériques aériennes et les images argentiques numérisées. Dans les deux images, on a rehaussé le contraste pour faire apparaître les lignes électriques passant sur une surface d'eau.

cision nécessaire aux applications métrologiques, cela nécessite de garantir la parfaite stabilité du capteur par rapport à l'optique (ainsi que celle de l'optique elle-même...). Cela est rarement le cas avec les appareils grand public et, en photogrammétrie terrestre, l'offre d'appareil photos dédiés aux applications métrologiques de la photogrammétrie est extrêmement limitée ; on peut y voir une des faiblesses techniques de la photogrammétrie numérique terrestre actuelle ; nous pensons plutôt que cette absence d'offre reflète une absence de demande parce que le marché de la métrologie a été essentiellement capté par les scanners lasers. On ne peut qu'espérer, avec ce que certains auteurs appellent le retour de l'appariement d'image (par exemple Haala, 2009) que, pour les domaines scientifiques, on va voir émerger une offre de caméras numériques métrologiques de prix raisonnable.

Enfin, concernant les changements, les plus fondamentaux, apportés par des protocoles d'acquisitions « massives » (Figure 3) rendant possibles de nouveaux traitements plus automatiques et plus fiables on peut citer deux directions principales :

- premièrement, la possibilité d'acquérir autant de photos que nécessaires pour que tous les points de

vue soient reliés entre eux par des images intermédiaires assez proches deux à deux, garantit que les algorithmes de traitement d'image pourront trouver automatiquement suffisamment de points de liaison entre paires consécutives, la formulation rigoureuse de ce point est un peu complexe et fait intervenir la notion de K-connexité (Gondran, 1994) ; cette densité du graphe des photos ayant suffisamment de points communs permet le calcul automatique des solutions initiales au problème de l'orientation relative et assure la précision finale des résultats dans la phase d'ajustement de faisceaux ; par ailleurs, cette densité des canevas photogrammétriques, en augmentant la redondance des systèmes à résoudre, rend aussi possible, au moins pour les applications non métrologiques, les approches d'auto-calibrage de la caméra et allège ainsi très sensiblement le processus ;

- deuxièmement, la possibilité de photographier le même point terrain depuis un grand nombre de points de vue, permet d'utiliser des méthodes de corrélation multi-images ; dans ces méthodes, au lieu de comparer simplement les « vignettes » images deux à deux, on valide un point en 3D

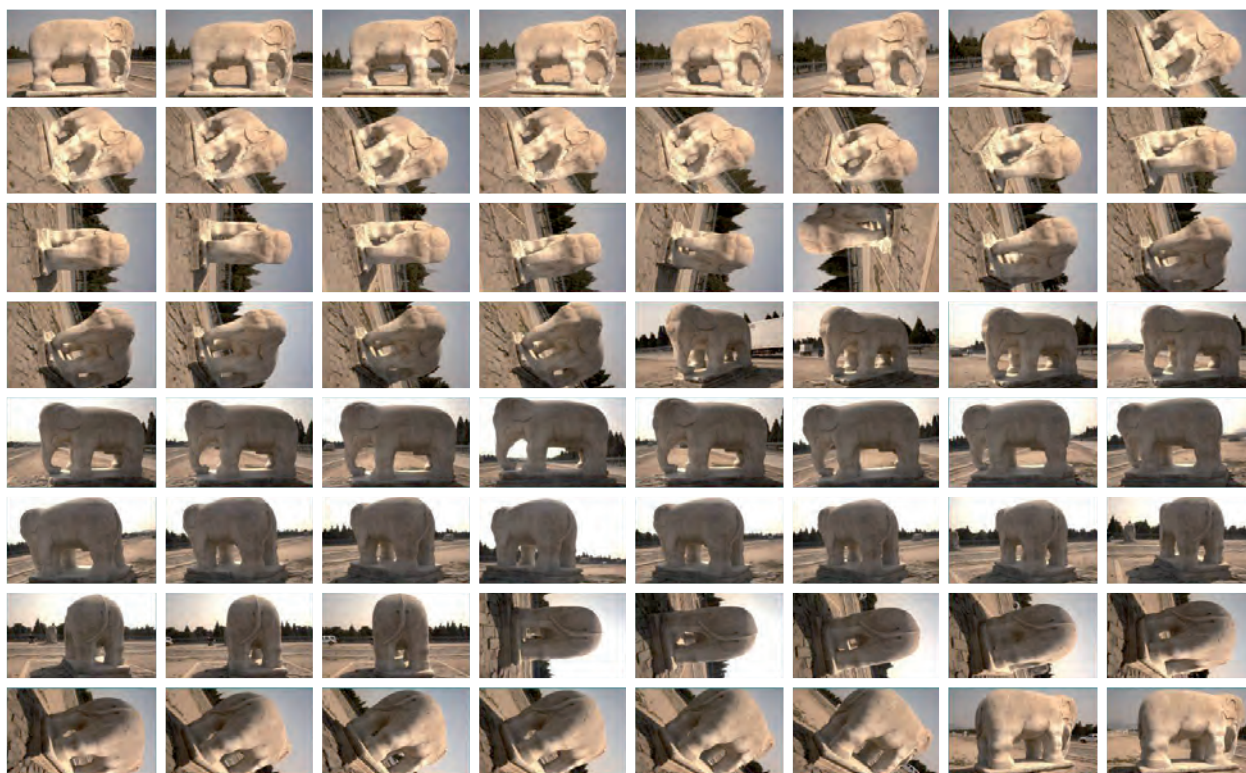


Figure 3 - Exemple des « nouveaux » protocoles d'acquisition utilisés en photogrammétrie numérique. Ci-dessus, planche des 66 images utilisées pour acquérir le modèle de l'éléphant ; à droite, position des caméras.



en quantifiant la ressemblance conjointe de l'ensemble de ses projections sur plusieurs images (typiquement 3 à 9) ; on augmente ainsi fortement la fiabilité des appariement puisque la probabilité que les points se ressemblent simultanément dans toutes les images sans être réellement homologues diminue sensiblement quand on utilise 3 ou 4 images ; l'augmentation du nombre de mesures pour un point, permet aussi d'améliorer la précision des mesures.

Lorsque l'on peut contrôler finement l'acquisition (ce n'est pas forcément le cas en aérien), on préférera exploiter en multi corrélation des ensembles d'images correspondant à des bases faibles, typiquement ce sera des rapports base-hauteur entre un et trois dixièmes. Ce rapport base sur hauteur est défini comme le rapport entre la distance entre les sommets de prises de vue divisé par la profondeur moyenne de la scène ; à précision d'appariement constante des pixels homologues, la précision de mesure de profondeur est inversement proportionnel à ce rapport ; mais plus ce rapport est élevé, moins les images se ressemblent et plus il est difficile d'apparier de manière robuste et précise. Pour la stéréo-restitution manuelle on recommande plutôt des bases fortes (jusqu'à un rapport de B/H de un) parce que l'opérateur humain est très robuste et sait éviter les fautes d'appariement alors qu'inversement il n'est pas forcément productif pour aller saisir de manière très sub-pixelaire des images qui se ressemblent fortement. Inversement l'opérateur automatisé est assez performant pour apparier finement des images qui se ressemblent alors qu'il peut voir ses performances chuter de manière incontrôlée lorsque la différence des points de vue crée des dissimilarités trop fortes entre points homologues.

3 - Fusion des approches de photogrammétrie et de vision par ordinateur

Les communautés de photogrammétrie et de vision par ordinateur travaillent sur la même problématique scientifique qui est la modélisation 3D à partir de photo en utilisant le principe de la stéréoscopie artificielle. Cependant malgré ce point commun « fondateur », les deux populations ont longtemps travaillé en parallèle, chacune étant focalisée sur ses objectifs applicatifs et n'ayant qu'une connaissance assez limitée des travaux de l'autre monde.

Traditionnellement, la photogrammétrie est d'abord une technique métrologique de mesure de distances ; que ce soit en cartographie, ou pour les applications architecturales et industrielles son objectif principal est la précision des mesures qu'elle fournit beaucoup plus que l'automatisation totale de ses processus. En 2000, les photogramètres travaillaient donc sur des images argentiques numérisées, les seules à avoir une résolution suffisante, avec des outils de stéréo-resti-

tution faisant fortement appel à la vision et l'intelligence de l'opérateur humain.

La vision par ordinateur, technique beaucoup plus récente, est une branche de la robotique qui a pour objectif d'utiliser des paires d'images stéréoscopiques pour acquérir l'information tridimensionnelle permettant à un robot de naviguer de manière autonome dans un environnement inconnu. Par nécessité, la vision par ordinateur ne s'intéresse qu'à des processus 100 % automatisés, programmables en temps réels et travaille dès le départ sur des images acquises par des caméras numériques qui, dans les années 2000 étaient encore de résolution faible. Par contre la contrainte de précision y est relativement peu présente, l'objectif principal étant une reconstruction relative de l'environnement permettant d'éviter les collisions.

C'est encore l'arrivée d'appareil numérique de qualité de plus en plus grande, qui a motivé des travaux de recherche visant à réaliser des modélisations 3D par photo qui réunissent la précision de la reconstruction photogramétrique avec l'automatisation des travaux de vision par ordinateur. Au départ c'est surtout les roboticiens qui ont les premiers « franchi la frontière » avec les applications de SLAM (simultaneous localization and mapping) dans lesquelles le robot ne reconstruit plus simplement son environnement immédiat mais cherche à intégrer l'ensemble des données acquises depuis son départ pour créer une carte 3D complète ; pour éviter les phénomènes de dérive, ils ont « emprunté », puis ont revisité les techniques d'ajustement de faisceaux.

Le développement des appareils, la fusion des deux approches, et la création d'une communauté de recherche spécifique émulée par une compétition très ardente a créé les conditions dans lesquelles ont émergés les progrès spectaculaires déjà décrits ; ces progrès ont souvent été possibles en empruntant des outils mathématiques assez sophistiqués aux domaines connexes. Pour la grande majorité de ces travaux, les progrès ont surtout consisté en améliorations et intégrations de plus en plus poussées de techniques déjà anciennes venant parfois de domaines assez éloignés (tels que les « *graph cuts* », par exemple Labatut, 2007).

Il y a cependant un aspect pour lequel on peut estimer qu'il y a eu un vrai saut, c'est le calcul des points de liaisons. Cette étape préliminaire : trouver des points homologues fiables et suffisants à partir des seules images en recouvrement, est le « chaînon manquant » qui aurait empêché il y a dix ans de concevoir par assemblage des briques existantes un processus complet de modélisation 3D automatique. Aujourd'hui, avec des algorithmes tels que SIFT (Lowe, 2004), le plus célèbre, mais aussi SURF (Bay 2008) ou MSER (Donoser, 2006), on est capable, étant donné deux images suffisamment texturées visant partiellement la même scène, et rien de plus (aucun a priori sur l'orientation) de trouver de manière rapide, avec très peu de faux appariements, un ensemble conséquent de points

homologues. Non seulement, aucun de ces algorithmes n'existait il y a une décennie, mais très peu de personnes auraient à l'époque imaginé que ceci serait réalisable quelques années plus tard. C'est ce qui selon nous différencie une vraie rupture de technologie d'une succession d'évolutions progressives.

4 - L'apparition des scanners lasers

Un élément de contexte important pour analyser l'évolution de la modélisation 3D par photo depuis une dizaine d'années est l'apparition à la fin des années 1990, puis le déploiement massif dans le courant des années 2000, des scanners laser, qu'ils soient aériens ou terrestre. Lorsque, au-delà des prototypes de laboratoires, la preuve du potentiel opérationnel de ces nouveaux outils est devenue évidente, une partie de la communauté cartographique a prédit la disparition certaine, à plus ou moins brève échéance, de la modélisation 3D par photogrammétrie. La « prédiction » se basait sur la comparaison avec les techniques de corrélation automatique à partir d'images analogiques qui étaient encore majoritaires à l'époque ; elle se serait sans doute réalisée sans l'apparition du numérique.

Comme rappelé précédemment, le numérique a complètement renouvelé les possibilités de restitution 3D automatique par photo, en améliorant la qualité des images et, surtout, en permettant de multiplier à coût quasi nul les points de vue. De manière assez emblématique, un article de la photogrammetric week 2009 (Haala, 2009) s'intitulait « *the come back of digital image matching* » et montrait, à partir de comparaisons chiffrées, qu'en cartographie aérienne la multi-corrélation d'images numérique avait des performances équivalentes aux acquisitions laser (hors végétation). Depuis quelques temps, certains auteurs, aussi téméraires que les précédents, prédisent d'ailleurs la disparition à moyen terme des scanners laser...

Dans l'état actuel, les deux techniques ont clairement des avantages complémentaires :

- la numérisation par laser donne des résultats avec très peu de fautes, elle fonctionne sur presque tous les matériaux (alors que la photogrammétrie nécessite des matières texturées), en zone végétale de densité modérée une partie des échos atteint le sol et permet ainsi de modéliser simultanément le terrain et la canopée ;
- la numérisation par photo nécessite un matériel moins cher (50 fois) et moins lourd (10 fois) que le laser, elle permet une acquisition plus rapide, le matériel peut donc être embarqué sur un « vecteur » léger (drone, perche, piétons, plongeur,

cerf-volant...), le même matériel est utilisable à presque toutes les échelles, en plus de la géométrie on obtient une radiométrie de haute qualité directement superposable aux points 3D.

Ce bref rappel des avantages comparés nous semble suffisant pour affirmer que si une des deux techniques doit un jour supplanter l'autre ce n'est probablement pas à court ou moyen terme. Ce qui est certain est que leur futur est lié et chaque technique doit se positionner par rapport à l'autre ; à titre d'exemple, si la modélisation par photo a évolué vers des techniques de plus en plus automatiques et a reculé fortement sur les applications météorologiques, c'est en grande partie une conséquence de l'apparition des techniques lasers.

5 - L'environnement numérique

La photogrammétrie, technique maintenant complètement numérique, est évidemment influencée directement par l'évolution générale des techniques informatiques et de la place croissante d'internet dans l'informatisation des processus. Parmi ces évolutions, deux ont déjà commencé à faire évoluer les pratiques de la photogrammétrie :

- le développement du calcul parallèle à bas coût, notamment grâce aux cartes GPU ; à plus longue échéance, cela permettrait d'envisager que le traitement photogramétrique automatique se fasse en temps quasi réel et simultanée avec l'acquisition, ce qui serait un progrès fondamental en terme d'ergonomie ;
- le développement des WEB services dédiées à la photogrammétrie, l'intérêt par rapport à une diffusion classique sous forme de logiciels est évidemment de factoriser la puissance de calcul (*cloud computing*) et de décharger l'utilisateur des problèmes d'installation et de portabilité des logiciels ; ces services existent déjà pour les applications ludiques à destination du grand public, mais ils sont encore très peu développés dans les applications scientifiques.

Les paragraphes précédents ont analysé les différents éléments permettant d'expliquer les changements fondamentaux qu'a connus la photogrammétrie depuis une dizaine d'années. Dans un environnement très complexe ou se combinent de nombreuses évolutions continues, souvent de plus en plus rapides, nous avons distingué deux points qui nous semblent avoir été de vrais éléments de rupture : l'apparition de méthode efficace de calcul de points de liaisons, telle que SIFT, et la possibilité, grâce aux appareils numériques, de définir de nouveaux protocole d'acquisition où la masse des photos redondantes permet d'assurer l'automatisation, la robustesse et la précision.

II - LA CHAÎNE PHOTOGRAMMÉTRIQUE « LIBRE » DE L'IGN

1 - Positionnement par rapport aux autres solutions

L'offre de services de numérisation 3D à partir de photos peut prendre les formes suivantes : logiciel traditionnel distribués sous licences commerciales, service WEB, logiciels open source.

L'avantage ressenti des logiciels sous licences commerciales est d'offrir la sécurité d'un service de support et de documentation ; leur inconvénient est d'être relativement chers et, à notre connaissance, de ne pas avoir évolué de manière significative pour prendre en compte la très grande automatisation rendue possible depuis quelques années. L'avantage des services WEB est la simplicité d'utilisation pour l'utilisateur final, la mise en commun des ressources de calcul et, pour les services existants aujourd'hui, la gratuité (mais ce ne pas intrinsèque au modèle, et sans doute provisoire...) ; leur limitation est de nécessiter de disposer d'une connexion internet, d'imposer à l'utilisateur de communiquer ses images ; par ailleurs, les services actuels ne donnent pas accès au code source ce qui ne permet pas d'adapter les outils finement aux besoins des utilisateurs et met ceux-ci en situation de dépendance.

En modélisation 3D, comme dans tous les domaines numériques, les logiciels open source, libres et gratuits, sont une alternative intéressante pour les utilisateurs, surtout pour le grand public (d'abord sensible à la gratuité) et pour les laboratoires scientifiques (d'abord sensible à l'indépendance). Un site internet recense les solutions photogrammétriques libres (OSP, 2010). La plus connue de ces solutions libres est basée sur *bundler* (Snavely, 2008) et *PMVS* (Furukawa, 2009). Ces solutions sont conçues d'abord pour le grand public, et leur priorité est de pouvoir opérer sur des photos prises avec un très faible *a priori*, certains travaux s'intéressant même à la modélisation à partir d'images glanées sur internet ! Les résultats obtenus sont souvent d'aspect très satisfaisant : les points 3D mesurés, même peu denses, sont complétés par des phases de triangulation permettant de les habiller avec la texture des images et la géométrie relative est suffisante pour assurer la cohérence visuelle du modèle. Cependant les résultats produits, sont souvent insuffisants pour beaucoup d'applications scientifiques où le modèle 3D est d'abord un instrument de mesure avant d'être un support de communication.

Pour ces applications scientifiques il importe, d'une part, de garantir, autant que possible, une densité de mesure forte et homogène des points 3D et, d'autre part, d'avoir une approche la plus exacte possible dans le calcul d'orientations des images ; ceci implique d'utiliser les modèles mathématiques de capteurs définis en fonction de la modélisation physique rigoureuse des caméras et des possibilités opérationnelle d'estimation précise des paramètres de ces capteurs.

Il est donc nécessaire de définir des protocoles d'acquisition qui prennent en compte à la fois les contraintes opérationnelles de prises de vues et les contraintes photogrammétriques, notamment en termes de densité du canevas qui permettra une reconstruction suffisamment précise. Ces protocoles prenant en compte simultanément les deux types de contraintes, ne peuvent émerger que d'un dialogue entre les scientifiques utilisateurs de ces techniques, architectes, archéologues, géomorphologues... et les scientifiques développant ces outils, photogrammètres, informaticiens... Concernant nos outils, ce dialogue est très largement entamé dans le domaine de l'architecture et du patrimoine (Clery, 2010 ; Godet, 2010 ; Vallet, 2010) et nous espérons, notamment à l'occasion de l'école d'été « Images et Modèles 3D en Milieux Naturels » (14 au 17 Juin 2011, Chambéry) pouvoir le développer avec les scientifiques travaillant sur les problématiques environnementales. Nous pensons que l'apprentissage en quelques heures de ces protocoles simples, s'il est contraignant pour le grand public qui va en général faire un ou deux modèles 3D avant de passer à un autre « jeu », est très vite rentabilisé pour les professionnels grâce au temps économisé dans les traitements ultérieurs.

Notre chaîne de traitement est issue de travaux de recherches, initiés en 2003, sur du calcul de modèle d'élévation à partir de mission aérienne numérique multi-stéréoscopique. Cette chaîne est utilisée pour la production de l'IGN et accessible en open source (MicMac, Apero, 2010) ; depuis 2007, la chaîne s'est diversifiée et elle contient aujourd'hui le pipeline complet permettant de transformer un ensemble d'image en un modèle 3D. Si à quelques occasions, notamment de « *benchmarking* », nous l'avons utilisée pour traiter des jeux de données acquis sans aucun protocole, cette chaîne de traitement n'est clairement pas optimisée pour cet usage.

2 - Protocoles

Le protocole que nous décrivons ici est typiquement adapté aux utilisateurs qui peuvent acheter un appareil reflex, éventuellement d'entrée de gamme ; il suppose que les réglages de l'appareil (zoom s'il y en a, et mise au point) soient constants. Si l'on dispose d'une caméra photogrammétriquement stable, ce protocole peut évidemment être utilisé en supprimant la première phase de calibrage ; il peut être aussi utilisé avec un appareil de type compact mais avec des précisions moins bonnes.

Ce protocole, permettant par exemple de traiter des objets de type statuaire ou des modélisations d'intérieur, est constitué de trois phases :

- acquisition pour le calcul de la valeur initiale des paramètres internes (focale, point principal, dis-

torsion) ; cette phase est constituée de cinq à dix images convergentes sur une portion de scène texturée et présentant des variations importantes de profondeurs (pour la détermination de la focale) ; cette phase permet de diminuer les risques de divergence dans le calcul de l'orientation de grands blocs ; si cette phase est omise et que le bloc converge quand même, alors cette omission n'aura pas d'influence sur la précision finale ;

- acquisition pour le calcul de l'orientation du bloc ; les images sont acquises en se déplaçant « lentement » afin que deux images consécutives se ressemblent beaucoup (point de vue proches) et aient un fort recouvrement, à titre d'ordre de grandeur, il est prudent d'assurer un recouvrement de 80 % sur un bloc linéaire et de 60-70 % sur un bloc bidimensionnel ;

- acquisition pour la corrélation, les images de cette phase sont constituées de groupes de 3 à 6 images convergentes à B/H faibles ; dans chaque groupe une image centrale sera utilisée pour donner un nuage de point dans la géométrie de cette image, on obtiendra donc par chaque groupe une géométrie de donnée équivalente à un scan laser terrestre, c'est-à-dire que les points XYZ sont issus de mesures de distance sur des faisceaux de droites convergeant toute vers le même point ; comme avec le laser, une des difficultés de cette étape est d'assurer qu'il y aura suffisamment d'images pour ne pas avoir de parties cachées inacceptables.

Pour des acquisitions aériennes, le protocole est plus simple puisque, d'une part, le vecteur ne permet pas en général de spécifier des acquisitions de type convergent et, d'autre part, la géométrie générale de la scène permet une restitution, sous la forme d'une carte $Z = f(X, Y)$, à partir d'acquisitions à axes parallèles. Les spécifications sont donc proches des prises de vue aériennes classiques, à la différence près que l'on recommande si possible des recouvrements forts, par exemple jusqu'à 80 x 60 (c'est-à-dire 80 % le long d'un axe et 60 % entre les axes) ; l'ajustement du taux de recouvrement étant un compromis à trouver entre le coût de vol, le coût de la préparation terrain et le coût de traitement ; plus le bloc est dense : moins il nécessite de point terrain et plus son exploitation sera automatisable.

3 - Organisation de la chaîne

Notre « pipeline » de traitements a une architecture relativement classique en trois étapes séquentielles :

- la première étape consiste en un calcul de points de liaisons entre les images, pour ceci nous utilisons l'implémentation SIFT++ de l'algorithme SIFT, que nous avons intégré pour automatiser et accélérer le calcul de gros chantiers ; SIFT étant soumis à une patente de droits US qui peut être res-

trictive pour certains utilisateurs, il est possible de remplacer cette étape par n'importe quel générateur de points homologues ;

- la deuxième étape, réalisée par le logiciel APERO, consiste à calculer l'orientation et la position des images compatibles avec les points homologues et, éventuellement, d'autres observations (telles que points terrain, GPS embarqué...) ;

- la troisième étape, réalisée par le logiciel MicMac, consiste à calculer par appariement des cartes de profondeurs qui seront, si nécessaire, directement convertible en nuage de points.

Ce sont des outils en ligne de commande, paramétrables par des fichiers au format XML ; pour permettre une utilisation bas-niveau de ces outils en dehors de l'IGN, une documentation est en train d'être écrite et sera complète fin 2011. Ce niveau d'interface a été choisi pour permettre d'accéder à toutes les fonctionnalités, mêmes les plus ésotériques ; c'est une couche de portabilité bas-niveau pour des informaticiens voulant développer en se basant sur ce noyau ; mais ce type d'interface n'est clairement pas adapté aux chercheurs thématiques, et plusieurs interfaces ergonomiques sont en phase de développement.

4 - Principales caractéristiques techniques de l'orientation

Le logiciel APERO permet de calculer les calibrations externes des images à partir des points de liaisons et d'éventuelles données auxiliaires. En l'absence de donnée auxiliaire, les résultats sont bien entendu purement relatifs et définis à un facteur d'échelle, une orientation et une origine près. Les principaux modules d'APERO sont les suivants :

- module de calcul des solutions relatives initiales, en utilisant les algorithmes classiques de photogrammétrie-vision par ordinateur tels que matrice essentielle, relèvement dans l'espace ;
- modules permettant le géo-référencement des solutions à partir de points terrains ou de GPS embarqués ;
- module d'ajustement de faisceau permettant de compenser l'ensemble des observations pour affiner la précision du résultat.

Lors de la phase de compensation, APERO permet, sous le contrôle de l'utilisateur, de recalculer directement à partir de la mission tout ou partie des paramètres internes des caméras ; ce fonctionnement est recommandé comme l'option par défaut si l'on n'utilise pas de caméra spécialement construite pour assurer la constance de ces paramètres au cours du temps. Il existe par ailleurs des options permettant de laisser chaque image avoir ses propres paramètres internes ; cette option n'est évidemment pas recommandée en général mais elle peut s'avérer utile en macrophotographie d'objet non plan, où l'on est obligé d'activer

l'autofocus de la caméra (induisant de fortes variations de focales pour chaque image).

APERO propose un grand nombre de modèles de calibration interne : modèle radial, modèle décentrique, modèles photogrammétriques « classiques » (Ebner et Brown), modèle polynomiaux quelconques et différents modèles de *fish-eyes*. Le choix du « bon » modèle est important pour éviter les sur ou sous paramétrisations qui sont des sources potentielles d'imprécision. Si le choix entre ces modèles demande une certaine expertise, il faut noter qu'en dehors des applications métrologiques ou de l'utilisation d'optiques très particulières, le choix « prudent » du modèle radial donne en général des résultats stables et satisfaisants ; pour les *fish-eye*, le choix par défaut est celui du modèle dit équidistant (WIKIPEDIA, 2011) complété aussi d'une distorsion radiale.

5 - Principales caractéristiques techniques de l'appariement

Le logiciel MicMac calcule la mise en correspondance dense des images en cherchant une carte de profondeur permettant de maximiser la ressemblance des points reprojetés tout en satisfaisant certains *a priori* sur les solutions recherchées.

La mesure utilisée par MicMac est la plus courante des mesures utilisées en appariement d'images, il s'agit du coefficient de corrélation normalisé centré sur des vignettes carrées autour de chaque pixel, qui a l'avantage d'être invariant aux principales transformations radiométriques. Les méthodes traditionnelles de corrélation stéréoscopiques simples recherchent, pour chaque point d'une image, l'homologue dans

l'autre image ayant la meilleure corrélation sur une vignette de taille fixée. La Figure 4 illustre la limitation de la stéréoscopie simple : si la vignette est trop petite le résultat est très bruité car la mesure est locale et il est assez facile pour des points non homologues d'avoir une ressemblance forte, si la vignette est trop grande les détails du relief plus petits que la vignette disparaissent.

En multi corrélation, pour une profondeur donnée on projette un point 3D hypothétique dans l'ensemble des images qui sont susceptible de le voir et l'on mesure la ressemblance simultanée de l'ensemble des vignettes obtenues. La probabilité qu'un point 3D faux se projette par hasard sur 3 ou 4 images en des points qui se ressemblent diminue fortement avec le nombre d'images, on obtient ainsi une mesure brute beaucoup plus fiable, même avec de petites vignettes comme le montre la Figure 4 d (il reste un peu de bruit, mais aucun détail n'a disparu). Pour avoir une mesure encore plus robuste, MicMac utilise une approche multi-échelle et multi-résolution dans le calcul de l'appariement. Ces approches partent de la remarque, que lorsque les points sont vraiment homologues, les détails ainsi que leur environnement proche, moyen et lointain doivent se ressembler, autrement dit les vrais homologues se ressemblent à toute les échelles ; par contre les faux homologues peuvent se ressembler fortuitement au niveau du détail fin mais pas de leur environnement. Concrètement, on calcule une pyramide d'image et l'on commence par calculer une carte de profondeur à basse résolution, ensuite à chaque niveau on contraint la carte de profondeur de l'étape courante à rester relativement proche de celle de l'étape précédente. La Figure 5 illustre les différents niveaux de calcul.

Figure 4 - a) une image ; b) la carte de profondeur calculée en maximisant la corrélation d'une paire stéréo avec de petites vignettes ; c) idem avec de grande vignettes ; d) avec de la multi-stéréo et des petites vignettes.

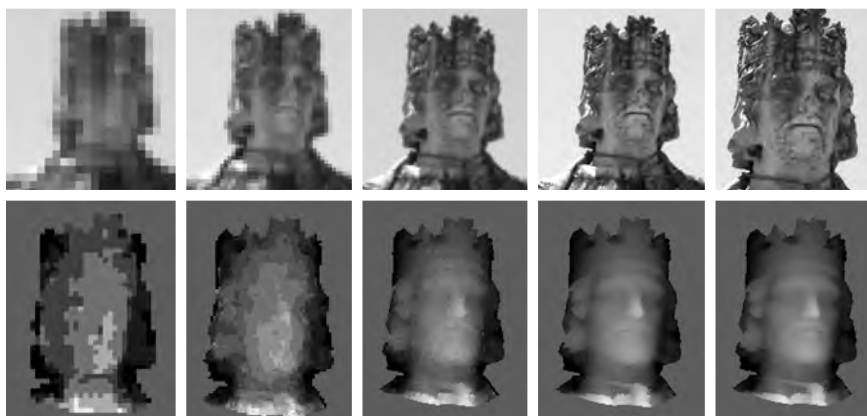
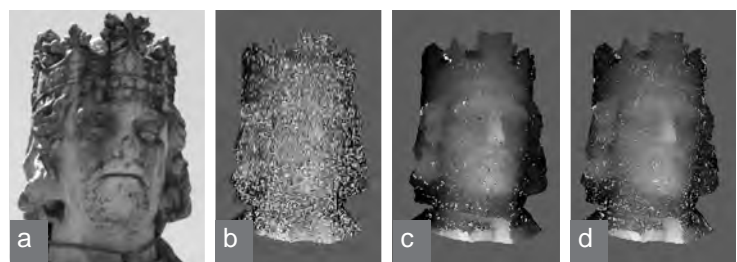


Figure 5 - Corrélation multi-échelle multi-résolution. En haut pyramide d'images ; en bas pyramide des cartes de profondeurs associées.

L'approche multi-échelle et la mesure multi-corrélation ne sont pas suffisantes pour supprimer toutes les fautes d'appariement, c'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter un « léger » a priori sur les solutions recherchées pour que, toutes choses presque égales par ailleurs sur la ressemblance entre images, on s'oriente sur des solutions ayant une certaine régularité. De manière classique, pour formaliser la satisfaction simultanée de ces deux critères incompatibles, on définit une fonction de coût qui est la somme du critère de ressemblance (corrélation) et du critère de régularité (variations de la profondeur), l'on cherche alors la solution qui minimise globalement l'intégrale de cette fonction de coût sur toute l'image ; un coefficient de régularisation permet de contrôler l'importance donnée à l'information a priori sur la régularité de la solution recherchée ; la Figure 6 illustre l'effet de ce coefficient.

6 - Version interfacée

Les outils en ligne de commandes, n'étant pas adaptés aux utilisateurs finaux, une interface graphique, est en cours de développement afin de fournir un accès simplifié et unifié à ces outils, notamment aux archi-

tectes, archéologues et géomorphologues. Grâce à l'interface, l'utilisateur peut manipuler les images d'un même chantier et contrôler chaque étape du traitement. Les résultats peuvent être convertis en cartes de profondeur ombrées ou en nuages denses de points 3D (au format *standard ply*), et peuvent être affichés directement par l'interface.

Pour offrir la possibilité de traiter des chantiers suffisamment variés, tout en masquant la complexité du paramétrage, la démarche retenue est de présenter à l'utilisateur un accès par grande famille de prises de vue, par exemple : chantier convergent, relevé de façades, chantier aérien sub-vertical, modélisation d'intérieur... Une attention particulière est apportée à la qualité de la documentation et à la portabilité du produit sur les principaux types d'ordinateur grand public (Linux, Mac et Windows) ; pour ceci on s'appuie sur la bibliothèque QT qui est libre et portable. Cette interface, bien que non finalisée, permet déjà d'effectuer l'intégralité du traitement de chantiers de type convergent et est disponible en ligne. Des utilisateurs issus des différentes communautés de professionnels ciblées (archéologie, architecture, géologie, photogrammétrie architecturale) l'ont déjà testée et l'interface est régulièrement mise à jour afin de l'adapter aux remarques et demandes de ces testeurs (Figure 7).

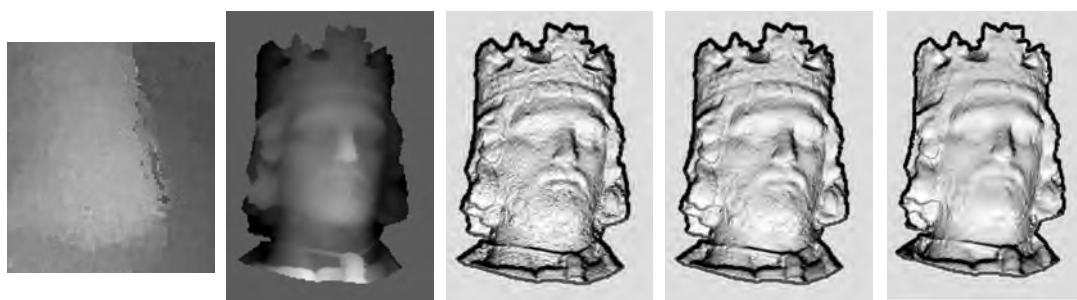


Figure 6 - Détail sur un défaut de corrélation, résultat après régularisation. En ombrage trois cartes obtenue avec différents paramètres de régularisation (faible, standard, fort).

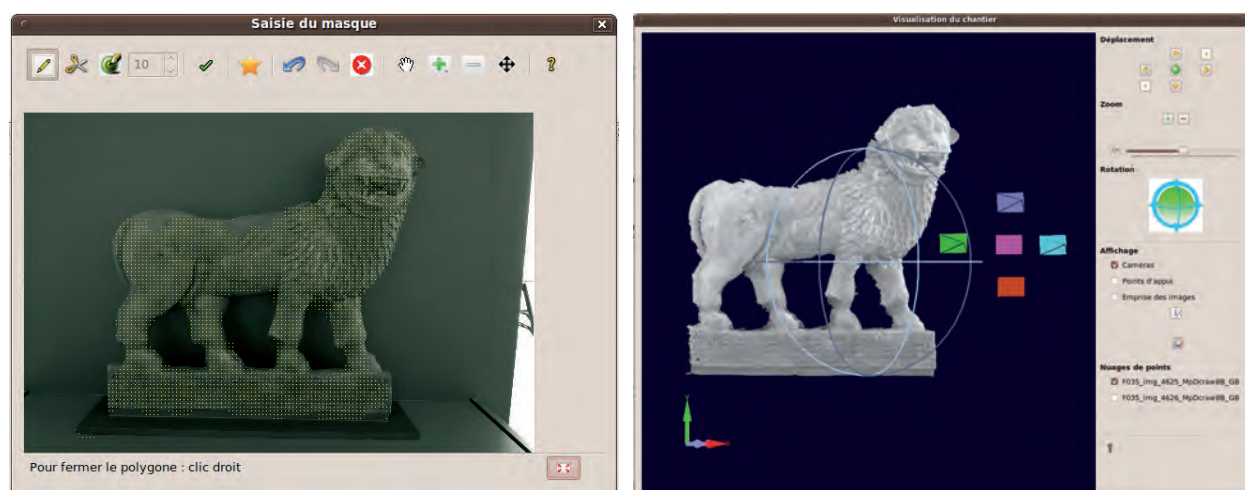


Figure 7 - Exemple de fenêtres de dialogue.

7 - Précision atteinte

Une des questions récurrentes des utilisateurs est « quelle précision » peut-on atteindre avec ces outils ? Si la question est légitime, il est très difficile d'y répondre. Bien sûr, toutes choses égales par ailleurs, la précision est directement proportionnelle à la résolution des images. Au-delà de cette évidence, la réponse est complexe car cela dépend à la fois de la définition de la précision, du type de scène et des conditions d'acquisition.

A partir des expériences que nous avons faites, de comparaison avec des lasers ou des mesures terrain en photogrammétrie aérienne, la précision est inférieure au pixel dans les conditions suivantes :

- surface non homogènes, ce critère est presque toujours vérifié sur des terrains naturel, par contre il restreint fortement l'usage pour de la modélisation d'intérieur de bâtiments modernes ;
- points suffisamment loin des discontinuités du reliefs, la frontière de ces discontinuités étant resti-

tuée avec une imprécision de 1 ou 2 pixel ;

– B/H autour de 0,2 ;

– portion de blocs sans donnée d'appuis de taille relativement petits à cause des problèmes de dérive de l'orientation.

Le dernier critère est malheureusement le plus flou. Sur nos expériences, pour un objet de type sculpté dont on fait le tour, et qui est de taille suffisamment faible pour être contenu sur une photo, il n'y a pas de problème de dérive significative. Par contre, sur un objet de type « ruban » en l'absence de donnée d'appuis la dérive est mal connue et probablement importante. Pour ce type de problème, les estimations habituelles basées sur la variance et la covariance ne nous semblent pas suffisantes. Le développement d'estimateur de la stabilité du bloc pourrait être un axe de recherche. En parallèle, pour les scènes d'extérieurs sur des objets éloignés, le couplage précis avec un GPS associé à l'appareil photo serait sûrement une solution pour améliorer la précision des blocs en évitant les effets de dérive (c'est-à-dire de cumul des erreurs).

III - EXEMPLES DE RÉALISATIONS ET PROTOCOLES POUR LES MILIEUX NATURELS

Dans cette partie nous allons décrire un certains nombre de réalisations, effectuées avec la chaîne de traitements présentée, et illustrer l'aspect souple et adaptable de la photogrammétrie comme technique de modélisation 3D en discutant notamment, sur des exemples concrets, comment cette technique se positionne par rapport au laser.

1 - Prise de vue aérienne

Les Figures 8 et 9 présentent des résultats de calcul de modèles numériques de terrain à partir d'acquisitions aériennes avec des moyens très légers et des appareils photos pesant entre 200 et 500 grammes. Dans le cas de la Figure 8, il s'agit d'un petit avion en polyester et dans le cas de la Figure 9 d'acquisition avec un cerf-volant. Dans ces deux opérations, le vec-

teur ne permet pas de suivre un plan de vol régulier et le pilotage se fait « à vue », c'est le calcul au sol qui permet de retrouver le tableau d'assemblage puis les orientations. Pour ce type d'acquisition, on fait les calculs directement en géométrie terrain et on obtient un MNE complet sous la forme d'une grille régulière. Pour ces chantiers la résolution était de deux à trois centimètres. Pour des petits chantiers de ce type, de l'ordre de moins d'un kilomètre carré, la réalisation d'un vol lidar, aéroporté ou héliporté, coûterait beaucoup plus cher et n'offrirait pas la même résolution.

Pour le MNE sur Draix (Figure 8), on a utilisé 150 images acquises avec un petit appareil compact. L'optique est d'assez mauvaise qualité et c'est un des rares cas où l'on a utilisé un modèle de distorsion complexe (modèle radiale combiné avec un modèle polynomial de degré 5).

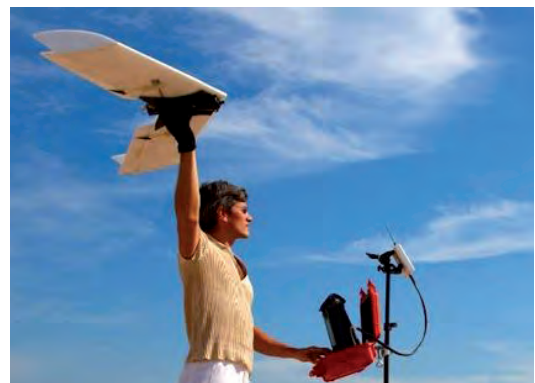
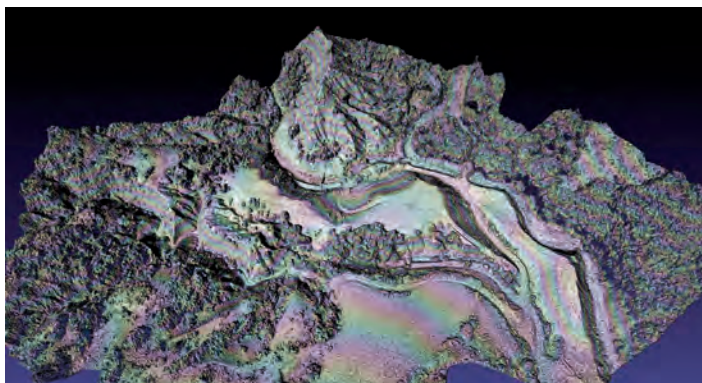


Figure 8 - Modèles numériques de terrain calculés à partir d'un drone Lheman sur le bassin versant de Draix (Alpes de Haute Provence) : visualisation en ombrage et ipsométrie ; à droite, le drone au décollage.

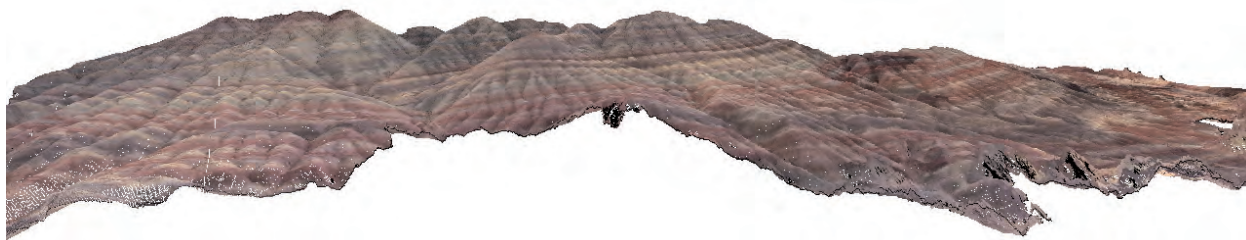


Figure 9 - Visualisation en nuage de points d'un MNT et d'une ortho photo calculés à partir de photos acquise par cerf-volant sur les mines de sel de Dugazi en Azerbaïdjan (mission CNRS, photos Sandrine Sanz).

Le MNE sur Dugazi (Figure 9), a utilisé 100 images acquises avec un bridge de bonne qualité. Quelques points terrain mesurés au GPS ont permis de faire un géo-référencement approximatif.

2 - Prise de vue terrestre extérieure

Pour la modélisation d'extérieur à partir d'acquisition terrestre, l'intérêt de la photogrammétrie est le poids du matériel, que l'on peut mettre dans son sac à dos « au cas où », l'instantanéité de la prise de vue que l'on peut faire au fil de la marche, et l'aspect multi-échelle qui permet d'utiliser le même appareil pour modéliser la motte de terre ou le massif montagneux.

La Figure 10 présente un protocole d'acquisition très simple puisque complètement linéaire. Pour modéliser la falaise de Criel sur mer, on a marché sur la plage parallèlement à la falaise et pris des photos à intervalle régulier, en assurant des recouvrements forts (de l'ordre de 80 %), avec un reflex de bonne qualité (Canon 5D Mark 2). Il est probable qu'avec ce type

d'acquisition il y ait une dérive assez forte et l'utilisation d'un GPS synchronisé avec la prise de vue serait une des pistes pour limiter cette dérive.

La Figure 11 présente un essai de modélisation d'un « petit » bassin versant en faisant des acquisitions depuis le flanc de colline opposé. Les images sont toutes convergentes, pour avoir des conditions de stéréo optimale, on a créé de la parallaxe en 2 dimensions en se déplaçant horizontalement et verticalement.

La Figure 12 présente une expérience faite avec l'INRA, pour modéliser par photogrammétrie la surface des sols afin d'en tirer des indicateurs de rugosité. L'acquisition est très simple, faite de 5 photos convergentes acquises en une ou deux minutes.

3 - Prise de vue intérieure

En milieu naturel, la modélisation d'intérieur concerne essentiellement les grottes ; cela nécessite donc que l'on trouve un moyen d'éclairer la scène ; une fois cet aspect résolu, l'avantage potentiel de la

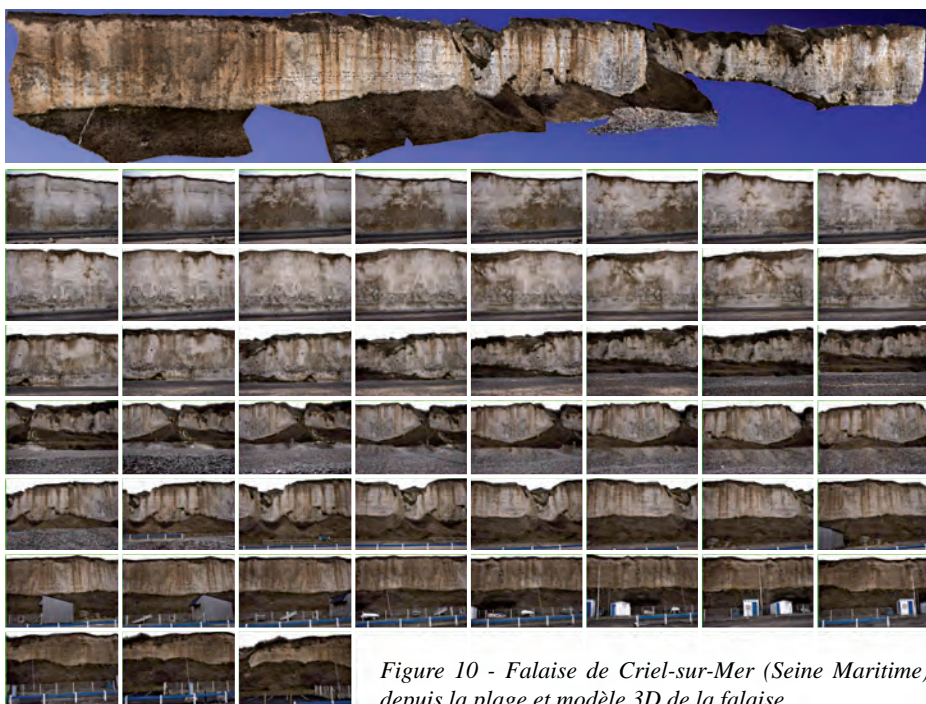


Figure 10 - Falaise de Criel-sur-Mer (Seine Maritime) : ruban des 56 photos acquises depuis la plage et modèle 3D de la falaise.

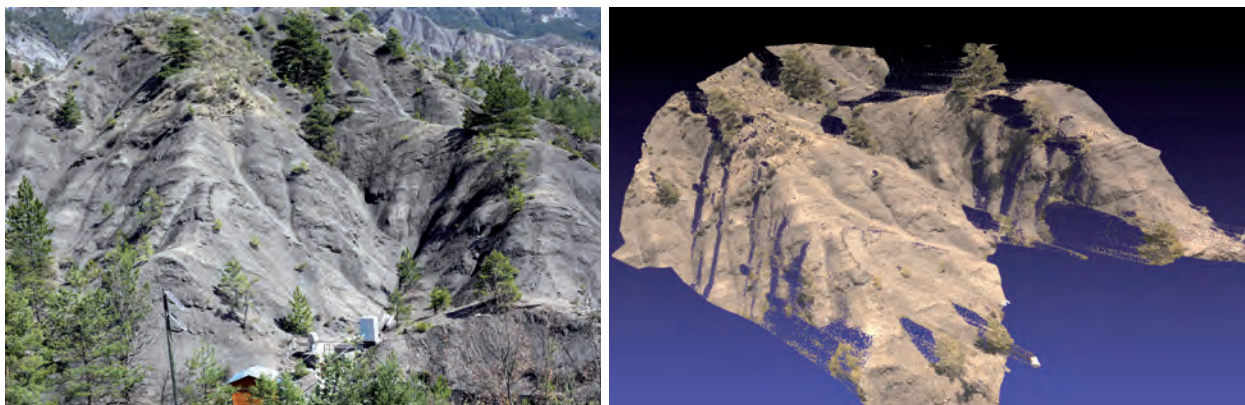
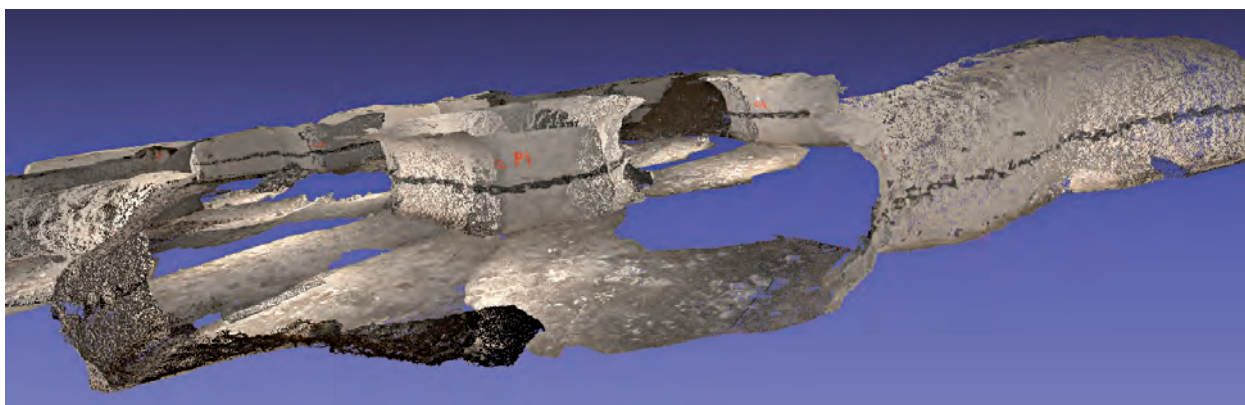


Figure 11 - Roubine de Draix, modélisation depuis le flanc de colline opposée : une des photos et le modèle 3D.



Figure 12 - Photo de sol et modèle 3D utilisé pour des calculs de rugosité.



photogrammétrie pour ce type de milieu est la rapidité des acquisitions, dans un milieu humide et froid où l'on souhaite limiter le temps de séjour, et le poids du matériel pour certaines cavités d'accès peu commode.

La Figure 13 présente une acquisition pour de la modélisation globale de scène d'intérieur ; ce type d'acquisition est très courant en architecture. En modélisation globale où l'on ne cherche pas nécessairement une grande précision mais où l'on veut couvrir complètement la sphère des directions, les objectifs *fish-eyes* sont très commodes pour limiter le nombre d'images. Les images brutes qu'ils acquièrent sont fortement déformées mais cela n'impacte pas du tout la géométrie du nuage si la distorsion est bien modéli-



Figure 13 - Marnière de Saint-Nicolas de la Taille (Seine Maritime) modélisée à partir de 350 photos acquises au *fish-eye* et utilisation du flash : extrait du modèle 3D et une des photos.

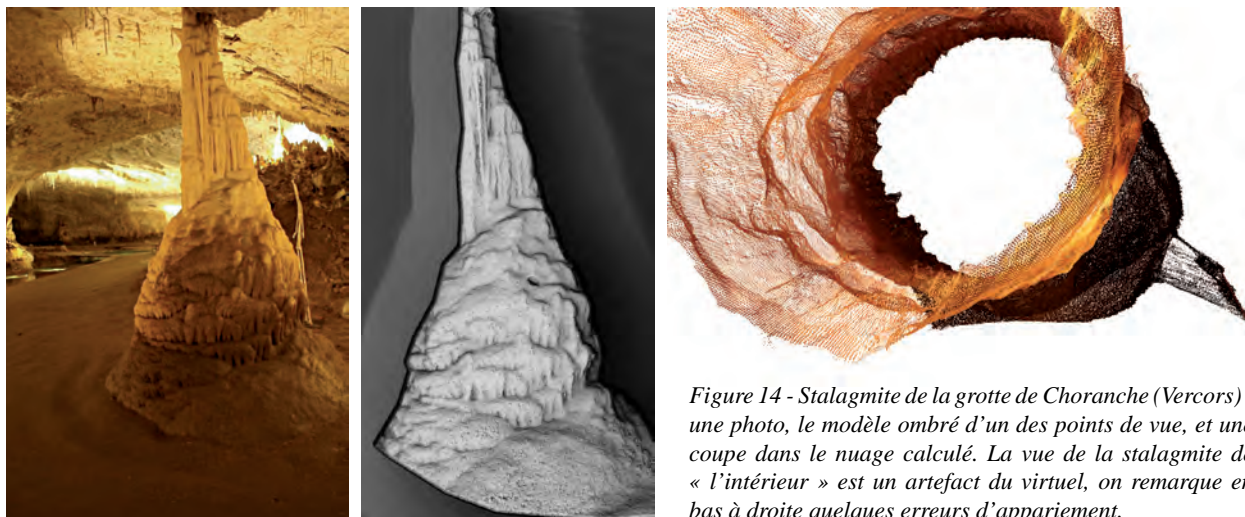


Figure 14 - Stalagmite de la grotte de Choranche (Vercors) : une photo, le modèle ombré d'un des points de vue, et une coupe dans le nuage calculé. La vue de la stalagmite de « l'intérieur » est un artefact du virtuel, on remarque en bas à droite quelques erreurs d'appariement.

sée. On peut d'ailleurs voir sur la Figure 15 l'image *fish-eye* très déformée alors que dans le nuage les lignes droites sont rectifiées. La nouveauté sur la manière de Saint-Nicolas de la Taille était de travailler au flash intégré afin d'avoir un mode opératoire le plus léger possible. La qualité d'image résultant du flash n'a pas trop perturbé le calcul ; le seul problème observé est que la portée angulaire de ces petits flashes est très inférieure à l'ouverture du *fish-eye*, seule donc la moitié de l'image est réellement utilisable.

La Figure 14 présente une acquisition pour de la modélisation de stalagmite, pour ce modèle on a réalisé 40 photos avec un protocole identique à celui que l'on utilise pour la modélisation de sculpture (voir Figure 3) ; l'expérience a été faite dans la grotte de Choranche qui est une grotte visitée et éclairée et les photos ont été faites sur pied, avec des temps de pose assez long (1/10 de seconde) en utilisant l'éclairage existant. De manière générale les grottes ne sont pas éclairées et il est probable que pour la calcite humide constituant ces stalagmites, l'éclairage au flash aurait posé des problèmes de réflexion spéculaire ; il suffit alors d'amener un éclairage très léger, de type led ou néon, et d'effectuer des temps de pose longs (1 seconde ou plus) en travaillant sur pied, nous avons expérimenté ces éclairages sur des problématiques archéologiques

(grottes de Mayenne science et de Rouffignac) et nous n'avons rencontré aucune difficulté d'exploitation.

4 - Milieux aquatiques.

Si l'avantage de légèreté et l'instantanéité de la photo est surtout évidente pour les acquisitions où le point de prise de vue est dans l'air (drone, cerf-volant), ce peut être aussi déterminant dans les milieux où le point de prise de vue est nécessairement sur l'eau ou dans l'eau. Les Figures 14 et 15 représentent deux expérimentations en milieu aquatique sur des problématiques architecturale et archéologique.

Pour la tour de Constance, la contrainte était de modéliser le pont y compris en dessous ; il fallait donc réaliser les acquisitions depuis une embarcation, nous avons choisi d'utiliser un *fish-eye* afin d'accélérer la prise de vue. Ce type d'acquisition serait, par exemple, tout à fait envisageable pour modéliser des gorges à partir de la rivière. Le modèle a été fait en mélangeant cent images *fish-eye* acquises depuis l'eau et cinquante images 24 mm acquises depuis la terre.

La Figure 16 représente le modèle 3D du brion (pièce située entre l'étrave et la quille) d'une épave modélisée à partir de 50 photos. La principale difficulté



Figure 15 - Modélisation du pont de la tour de Constance à Aigues-Mortes (Gard) à partir de photos acquises depuis une barque ; à droite une des photos acquises.

de la modélisation 3D sous-marine n'est pas la photogrammétrie mais la photographie ! En effet si le système optique global « objectif + interface air-verre-eau » se modélise très bien par autocalibrage, le problème de l'exploitation vient des conditions de visibilité qui font que les images sont souvent peu exploitables (l'image de droite est une des meilleures

images recueillies). Le modèle 3D du brion présenté fait 3 mètres de long ; si le résultat n'est pas très spectaculaire, il présente un intérêt scientifique potentiel en donnant une vision d'ensemble de la pièce que n'ont jamais eu les plongeurs au cours des 15 jours de la mission pendant lesquels la visibilité n'a pas dépassé le mètre.

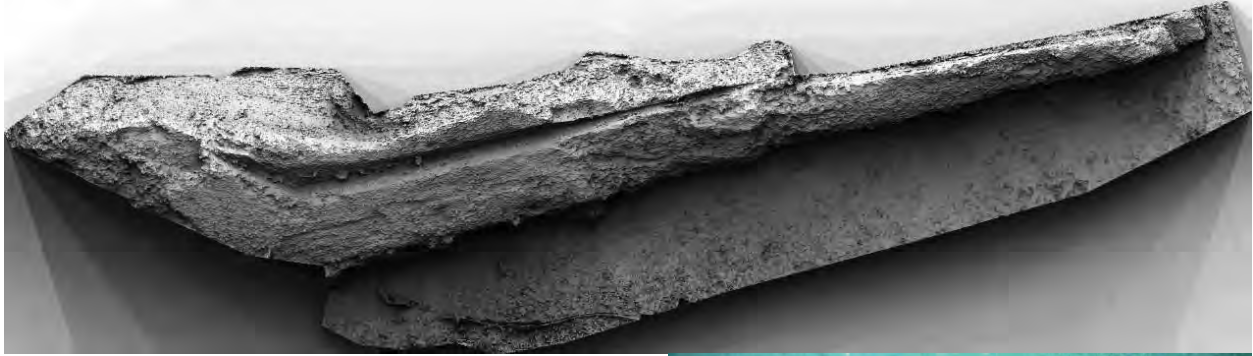


Figure 16 - Modélisation du brion de l'épave « Jeanne-Elisabeth » au large de Palavas-les-Flots (Hérault) : modèle 3D ombré et une des photos (mission DRASSM, Photo Philippe Groscaux).



CONCLUSION

Cette communication a rappelé comment, compte tenu des évolutions structurantes qu'elle a connues depuis les années 2000 avec le passage au numérique, la photogrammétrie est devenue aujourd'hui un moyen de modélisation 3D très compétitif pour beaucoup d'applications. Pour la modélisation des milieux naturels, à l'exception notable de la végétation et de la neige fraîche, elle donne des résultats comparables à ceux des scanners laser pour un équipement nettement plus léger et moins onéreux. Elle est aujourd'hui beaucoup moins répandue que ne le permettrait ses performances techniques, notamment parce qu'il manque encore des outils, si possible libres et gratuits, qui intègrent les méthodes automatiques et précises dans une interface ergonomique. Nous pensons que ces outils simples et performants, émergeront d'ici quelques années d'une des solutions en cours de développement dans la communauté.

Parmi les autres perspectives qui permettront un plus large déploiement de la photogrammétrie, nous envisageons essentiellement le développement

des services WEB, le développement de caméras métrologiques et le développement de solutions qui permettent une coopération étroite entre programmes automatiques et opérateur humain. Le déploiement de services WEB de photogrammétrie, s'appuyant sur des solutions libres, pourrait être une solution intéressante pour les utilisateurs en combinant la facilité d'utilisation, la mise en commun des ressources de calcul, et la transparence puisque les codes utilisés sur le serveur sont disponibles en mode source ; la question ouverte sera celle du modèle économique. Le développement de caméras légères permettant de faire de la métrologie fine par photogrammétrie (en assurant la rigidité du bloc capteur-optique) a presque disparu lorsque les lasers sont apparus ; à cette époque l'automatisme de la photogrammétrie n'était pas assez développé pour qu'il y ait une demande ; nous pensons que l'état actuel de la technique, décrit dans cet article, génère un nouveau potentiel pour de telles caméras, notamment pour les applications de suivis de déformations. La photogrammétrie traditionnelle est

essentiellement manuelle, les développements récents sont allés vers le tout automatique ; sur les chantiers complexes, le tout automatique ne pourra pas résoudre tout les cas, notamment parce que, sur une longue acquisition, on finira toujours par faire des erreurs ; il y

a donc surement un besoin pour des solutions logicielles intégrant interactivité, ergonomie et fort automatisme ; des solutions commerciales sont en train d'apparaître dans ce sens, il serait préférable qu'elles n'aient pas un monopole total.

BIBLIOGRAPHIE

- BAY H., ESSA A., TUYTELAARSB T., VAN GOOL L., 2008, Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110, 3, June 2008, 346-359.
- CLERY I., PIERROT DESEILLIGNY M., 2010. Interface ergonomique de calculs de modèles 3D par Photogrammétrie. In Colloque Photogrammétrie au Service des Archéologues et des Architectes, SFPT-CIPA, Villeneuve lez Avignon, Septembre 2010.
- DONOSER M., BISCHOF H., 2006. Efficient Maximally Stable Extremal Region (MSER) Tracking, 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1 (CVPR'06).
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2006. Carved Visual Hulls for Image-Based Modeling. *Lecture Notes in Computer Science*, 3951.
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2009. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence*, August 2010, 32, 8, 1362-1376.
- GONDRAN M., MINOUX M., 1994. Graphes et Algorithmes, édition eyrolles, ISBN : 2-212-01571-2.
- GODET A., PIERROT DESEILLIGNY M., DE LUCA L. 2010. Une approche pour la documentation graphique 3D d'édifices patrimoniaux à partir de (simples) photographies. In Colloque Photogrammétrie au Service des Archéologues et des Architectes, SFPT-CIPA, Villeneuve lez Avignon, septembre 2010.
- HAALA N., 2009. Comeback of Digital Image Matching. Photogrammetric Week 2009, Wichmann Verlag, Heidelberg, 289-301.
- KASSER M., EGELS Y., 2001. Photogrammétrie numérique. Paris, Hermès Sciences Publication.
- LOWE D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International journal of computer vision*, 60, 2, 91-110.
- LABATUT P., PONS J.-P., KERIVEN R., 2007. Efficient multi-view reconstruction of large-scale scenes using interest points, Delaunay triangulation and graph cuts. In IEEE International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, octobre 2007.
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2008. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International journal of computer vision*, 80, 2, 189-210.
- VALLET J.-M., DE LUCA L., FEILLOU M., GUILLON O., PIERROT-DESEILLIGNY M., BAUDRY O., TRABELSI N., 2010. An interactive 3-dimensional database applied to the conservation of a painted chapel. Proceedings of 7th International Conference on Science and Technology In Archaeology and Conservation. Workshop on Documentation and Conservation of Stone deterioration in Heritage Places. Petra (Jordan), December 7 to 12, 2010.
- WIKIPEDIA 2011, http://fr.wikipedia.org/wiki/Objectif_fisheye

SITOGRAPHIE

- ARC3D 2010, <http://www.arc3D.be/>
- GOOGLE SKETCHUP 2010, <http://sketchup.google.com/intl/fr/>
- MICMAC, APERO 2010. <http://www.micmac.ign.fr/>
- OSP 2010. <http://opensourcephotogrammetry.blogspot.com/>
- PHOTOFLY 2011. <http://labs.autodesk.com/technologies/photofly/>
- PHOTOSYNTH 2011. <http://photosynth.net/>

Applications

Travaux du laboratoire EDYTEM



Au recto :

Séance de relevé lasergrammétrique au col d'Entrèves (massif du Mont Blanc) pour un suivi diachronique des parois de haute altitude. A l'arrière-plan, l'Aiguille du Midi et les Aiguilles de Chamonix. La production de modèles 3D de haute densité permet d'analyser finement les éboulements et écroulements, dans le cadre de l'étude de leur relation avec la dégradation du permafrost. Photo : Emmanuel Malet.

QUATRE ANNÉES DE SUIVI DE LA MORPHODYNAMIQUE DES PAROIS ROCHEUSES DU MASSIF DU MONT BLANC PAR LASERSCANNING TERRESTRE

FOUR YEARS OF MONITORING OF ROCKWALL MORPHODYNAMICS IN THE MONT BLANC MASSIF BY TERRESTRIAL LASERSCANNING

LUDOVIC RAVANEL, PHILIP DELINE, STÉPHANE JAILLET

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, 73360 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

Contact : Ludovic.Ravanel@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

L'étude des écroulements rocheux en haute montagne est indispensable pour comprendre l'évolution des paysages et évaluer un risque naturel important. Alors que la vulnérabilité s'accroît tant en haute altitude que dans les fonds de vallée, la recrudescence actuelle des écroulements dans les Alpes est sans doute à mettre en rapport avec le réchauffement climatique au travers de la dégradation du permafrost de paroi. Toutefois, en raison d'un manque d'observations systématiques, la fréquence, le volume et les facteurs de déclenchement des écroulements restent mal connus.

Cet article présente et analyse un inventaire de 66 détachements rocheux (1 à 426 m³) obtenu par comparaison diachronique de modèles 3D à haute résolution issus de campagnes de laserscanning terrestre répétées annuellement entre 2005 et 2009 sur 9 parois rocheuses du massif du Mont Blanc. Ces parois sont situées entre 3000 et 4500 m d'altitude. Elles présentent une grande diversité de pente, d'orientation et de densité de fracturation, et ont connu des évolutions très variés. Le paramètre permafrost semble expliquer la plupart de ces évolutions.

MOTS-CLÉS : LASERSCANNING TERRESTRE, COMPARAISON DE MODÈLES 3D, QUANTIFICATION DE DETACHEMENTS ROCHEUX, PERMAFROST, MASSIF DU MONT BLANC.

ABSTRACT

The study of rockfalls in high mountain is essential to understand landscape evolution and to evaluate a significant natural hazard. While vulnerabilities are increasing in high altitude and in valleys, the present increasing number of rockfall events in the Alps is probably related to the Global Warming through the degradation of rockface permafrost. Nevertheless, due to a lack of systematic observations, the frequency and volume of rockfalls, as well as their triggering factors remain poorly understood.

This paper presents and analyzes an inventory of 66 rock detachments (1 to 426 m³) obtained by diachronic comparison of high resolution 3D models acquired by annually repeated terrestrial laserscanning campaigns between 2005 and 2009 on 9 rockwalls of the Mont Blanc massif. These are located between 3000 and 4500 m a.s.l. They have a wide variety of slope angles, aspects and densities of fractures, and have evolved in very different ways. The parameter permafrost seems to explain most of the situations.

KEYWORDS: TERRESTRIAL LASERSCANNING, COMPARISON OF 3D MODELS, QUANTIFICATION OF ROCKFALLS, PERMAFROST, MONT BLANC MASSIF.

INTRODUCTION

En haute montagne, le commandement des versants et les fortes pentes favorisent les processus géomorphologiques rapides. De l'avalanche rocheuse mobilisant plusieurs millions de m^3 à la chute de blocs décimétriques liée au dégel printanier, les volumes mis en jeu sont très variables : chutes de blocs ($1 m^3 < v < 10 m^3$), éboulements ($10 m^3 < v < 100 m^3$), écroulements ($v > 100 m^3$).

Ces dernières années, de grands écroulements (volume $> 1 Mm^3$) se sont produits en haute montagne à travers le monde, du Mount Munday (Colombie Britannique, 1997) à Kolka-Karmadon (Caucase, 2002). L'écroulement le plus important de la période récente dans les Alpes est celui qui a affecté la Punta Thurwieser (Italie, $2,5 Mm^3$). Les conséquences vont de la modification du paysage aux risques pour les infrastructures (refuges, remontées mécaniques), tandis que des effets en cascade peuvent affecter gravement les vallées, leurs voies de communication et leurs habitants.

Par ailleurs, les parois rocheuses en haute altitude sont caractérisées par la présence de permafrost, c'est-à-dire que leur condition thermique correspond à une température négative pendant au moins deux

années consécutives – seule une tranche superficielle, la couche active, présente une température positive durant la saison chaude. L'hypothèse d'une relation entre écroulements rocheux et réchauffement climatique *via* une dégradation (réchauffement) du permafrost s'impose aujourd'hui (Gruber et Haeberli, 2007 ; Ravanel et Deline, 2008, 2011 ; Ravanel *et al.*, 2010). Toutefois, en raison d'un manque d'observations systématiques, la fréquence, le volume et les facteurs de déclenchement de ceux-ci demeurent mal connus.

Cet article présente la méthode du laserscanning terrestre (TLS) appliquée au suivi morphométrique de 9 parois rocheuses du massif du Mont Blanc, massif cristallin externe des Alpes occidentales aux altitudes et dénivellations importantes. Une acquisition annuelle de modèles 3D à haute résolution permet une comparaison diachronique de ces modèles et la quantification des volumes rocheux disparus entre deux mesures. Nous présentons les principaux résultats de la période de mesure 2005-2009 et discutons des causes possibles de la variabilité de l'activité géomorphologique observée sur les différents sites suivis, dont la dégradation du permafrost pourrait être un facteur important.

I - DE L'ACQUISITION DES DONNÉES A LA QUANTIFICATION DES DÉTACHEMENTS ROCHEUX

Le levé de surfaces topographiques complexes comme les parois rocheuses pose de nombreux problèmes en planimétrie et en altimétrie si l'on utilise les techniques de mesure traditionnelles (station totale, théodolite etc.). De surcroît, ces techniques sont mal adaptées aux interventions fréquentes et dont la durée doit être courte (contraintes d'accès et météorologiques) qui sont requises pour l'étude des détachements rocheux dans les parois de haute montagne. La méthode TLS, méthode innovante dans le domaine de la topographie mais encore peu utilisée pour le suivi des dynamiques de versant en haute montagne (Rabatel *et al.*, 2008), permet de lever rapidement de grandes surfaces à très hautes résolutions et précision. Le traitement permet d'obtenir des modèles 3D de grande qualité, dont la comparaison diachronique autorise la mesure des changements morphologiques (Abellán *et al.*, 2006 ; Oppikofer *et al.*, 2008).

1 - Acquisition des données topographiques par TLS et construction des modèles 3D à haute résolution

Le TLS est apparu il y a une trentaine d'années, mais ce n'est que récemment que de nouvelles orientations ont été rendues possibles, grâce à de nouveaux

logiciels et à la précision croissante des scanners disponibles. Ces derniers sont des dispositifs d'acquisition actifs qui émettent de l'énergie électromagnétique sous forme de rayons lasers et enregistrent en retour la quantité de cette énergie renvoyée par l'objet scanné. La très grande exactitude relative à la mesure du temps d'aller-retour des rayons et à celle de l'attitude angulaire de chaque impulsion permet d'obtenir des nuages de points à haute résolution très rapidement, tout en s'affranchissant de l'inaccessibilité des parois.

Les premières mesures TLS dans le massif du Mont Blanc ont été réalisées en juin 2005. L'appareil utilisé est un *Optech* Iris 3D (Figure 1 a ; longueur d'onde : 1 500 nm ; acquisition de 2000 points par seconde ; portée utile : 600 m). La précision d'acquisition d'un point à 100 m est de 7 mm pour la distance et de 8 mm pour la position, selon les données du constructeur. Neuf parois, sélectionnées de façon à être représentatives des contextes topographique et géologique du massif, ont été scannées une à deux fois par an depuis 1 (Drus) à 5 stations de mesures (Grand Flambeau). La distance moyenne entre les parois et le scanner varie de 110 m à plus de 400 m. L'essentiel des campagnes de mesures est mené à la fin de la période estivale, lorsque la couverture glacio-nivale est réduite, le pic d'activité géomorphologique dépassé, et les conditions météorologiques stables.

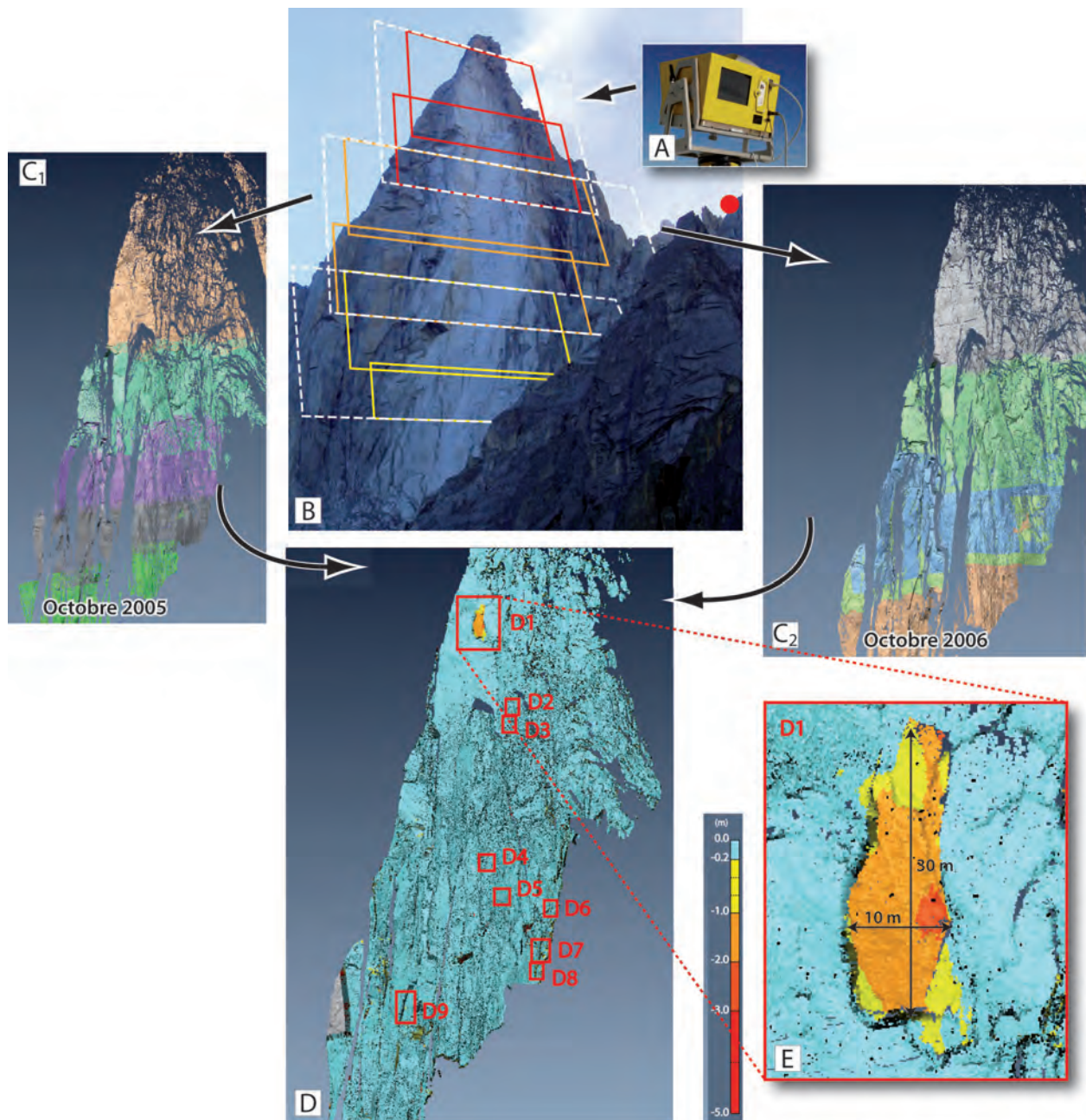


Figure 1 - Acquisition et traitement des données 3D à haute résolution.

A : le scanner laser Optech Illris 3D.

B : schéma d'acquisition des 6 nuages de points (ou fenêtres ; rectangles rouges, oranges et jaunes) de la face ouest des Drus en trois scènes (pointillés blancs). Le point rouge correspond à position de la station de mesure.

C₁ et C₂ : modèles 3D obtenus en 2005 et 2006.

D : comparaison des modèles 3D de 2005 et 2006 de la face et position des 9 détachements identifiés entre les deux dates.

E : Le principal écoulement (D1 ; 426 m³) relevé entre les deux dates.

L'initialisation et le paramétrage du scanner sont contrôlés par un pilote installé sur un ordinateur de terrain. Après détermination des fenêtres de prise de vues (Figure 1 b) et de l'espacement des points, l'acquisition s'effectue automatiquement. Les nuages de points obtenus sont assemblés sous la suite logicielle *InnovMetric PolyWorks* pour constituer un modèle 3D unique de la paroi (Figure 1 c ; Rabatel *et al.*, 2008). Deux d'entre eux sont d'abord assemblées à partir

de la reconnaissance de « n paires de points homologues » identifiés sur les deux scènes puis appariés. Cet alignement est ensuite amélioré en utilisant l'outil de recalage « *best-fit* », basé sur un algorithme itératif qui calcule un alignement minimisant les distances entre deux nuages qui se chevauchent.

Malgré plusieurs stations de mesure quand cela est possible, de nombreux masques résultent de la topographie de la paroi (dièdres, éperons, vires, surplombs)

et de la présence de neige et de glace sur celle-ci (ces deux objets empêchant la réflexion du signal dans la longueur d'onde utilisée).

2 - Comparaison des modèles 3D, identification et quantification des détachements rocheux

La comparaison de modèles 3D à haute résolution issus de la scannerisation des parois étudiées permet de mesurer leurs changements morphologiques.

Lors de la comparaison de deux modèles sous Polyworks, le plus ancien constitue la « référence », tandis que le plus récent est importé en tant que « donnée ». Les modèles sont recalés l'un par rapport à l'autre en suivant les étapes mises en œuvre lors de la création d'un modèle 3D (alignement par « n paires de points homologues » puis amélioration par « *best-fit* »), l'objectif étant de mettre l'objet « donnée » dans le même système de coordonnées que l'objet « référence ».

La comparaison des modèles 3D consiste ensuite à mesurer les différences entre ceux-ci, c'est-à-dire les distances qui séparent les points du modèle « donnée » des points les plus proches du modèle « référence ». Le résultat de cette comparaison est une carte des différences (Figure 1 d), sur laquelle chaque point du modèle 3D « donnée » est affecté d'une couleur en fonction de sa distance au point le plus proche du modèle 3D « référence ». L'opérateur peut alors identifier les détachements rocheux grâce aux couleurs de la carte et à l'échelle correspondante, en veillant à éliminer les différences qui résultent des variations de la couverture nivale sur les parois d'une année sur l'autre ou liées à des stations de mesure décalées.

Afin de s'affranchir des éventuels problèmes d'alignement de scènes (lors de la construction des modèles 3D) ou de modèles (lors de la comparaison),

et du bruit inévitablement lié aux modèles (incertitudes de mesure, c'est-à-dire les erreurs instrumentales et environnementales), une épaisseur « tampon » de 0 à -20 cm, laissée en couleur froide, est exclue de l'interprétation. Cette épaisseur tampon permet en outre d'alléger le travail de l'opérateur en ignorant les nombreuses petites chutes de pierre (volume < 1 m³) entre deux campagnes de mesure, alors que seuls les détachements rocheux d'un volume minimal de plusieurs dizaines de m³ sont pertinents dans le cadre d'une étude sur les éventuels effets de la dégradation du permafrost de paroi.

Une fois un détachement rocheux identifié, son volume peut être quantifié. Les nuages de points sont préalablement maillés afin qu'ils constituent des surfaces (ou modèles polygonaux) comparables. La longueur des arêtes est gérée de façon à ce que les maillages ne contiennent aucun trou. La carte des différences sert alors de point de départ dans Polyworks puisque les deux modèles comparés sont encore disponibles, recalés l'un par rapport à l'autre. Une entité géométrique de type plan doit être créée en arrière des deux modèles 3D alignés, puis le volume « plan à modèle 3D récent » est soustrait au volume « plan à modèle 3D plus ancien ».

Estimée avec la somme quadratique des erreurs présentes tout au long de la chaîne d'acquisition et de traitement des données, l'incertitude totale maximale sur le volume des détachements obtenus s'élève de 40 à 100 mm en fonction des parois et affecte presque exclusivement l'axe z du référentiel propre au scanner, généralement perpendiculaire aux parois scannées. Puisqu'ils font intervenir des variations sur l'axe z (pour le calcul de la distance entre les deux modèles comparés), les calculs de volume doivent impérativement tenir compte de cette incertitude : l'incertitude d'un volume détaché correspond alors à la valeur du produit de l'incertitude pour la paroi considérée par la surface affectée par le détachement.

II - SOIXANTE SIX CHUTES DE BLOCS, ÉBOULEMENTS ET ÉCROULEMENTS RECENSÉS

1 - 2 223 m³ de roche détachés des 9 parois suivies

Ce sont 43 modèles 3D qui ont été acquis entre 2005 et 2009 autorisant 29 comparaisons diachroniques (Tableau 1).

Aux Drus, trois comparaisons ont été menées entre octobre 2005 et septembre 2008. La première comparaison entre 2005 et 2006 indique le détachement de 546 m³ de roche (dont un écoulement de 426 m³ ; Figure 1 e), puis 22 m³ l'année suivante, et 11 m³ entre 2007 et 2008.

Sur la face sud de la Pointe de l'Androsace, deux campagnes de mesures (octobre 2007 et juillet 2009) ont été menées, qui ont permis une seule comparaison.

Une large partie de la paroi correspond à une grande cicatrice d'écroulement antérieure à la fin de l'été 2003. Sept détachements rocheux ont été identifiés, de 1 à 44 m³, dont seuls deux d'entre eux se sont produits hors de la cicatrice *ante* 2003.

Avec six campagnes de mesures, la face est de la Tour Ronde est l'une des mieux suivies du massif du Mont Blanc : des mesures y sont faites chaque année depuis 2005. Cette face est en outre l'une des plus actives : 14 détachements y ont été enregistrés, avec au total près de 1 000 m³ de granite. Le principal écoulement a mobilisé 327 m³ de roche entre juin 2005 et juillet 2006 ; il a déclenché deux détachements plus réduits en contrebas (Rabatel *et al.*, 2008).

Site	Surface (m ²)	Période	Nombre de détachements	Volume (m ³)		Altitude min. et max. (m)	Taux linéaire d'érosion (mm/an)		
				Total	2 principaux		1-100 m ³	> 100 m ³	Total
Les Drus (face W) 2730-3730 m	65 000	oct. 05 - oct. 06	9	546 ± 15	426 ± 13 et 84 ± 1,5	3320 - 3605	0,8	2,1	2,9
		oct. 06 - sept. 07	2	24 ± 1	22 ± 1 et 2 ± 0,1	3435- 3595			
		sept. 07 - sept. 08	4	11 ± 0,7	5 ± 0,2 et 3 ± 0,4	3365 - 3590			
Pointe de l'Androsace (face S) 3650-4107 m	65 500	oct. 07 - juil. 09	7	56 ± 4	44 ± 3 et 4 ± 0,5	3720 - 3830	0,56	0	0,56
Tour Ronde (face E) 3440-3792 m	82 000	juil. 05 - juil. 06	3	522 ± 37	313 ± 19 et 154 ± 10	3485 - 3590	1,4	2,0	3,4
		juil. 06 - oct. 06	0	/	/	/			
		oct. 06 - oct. 07	1	224 ± 12	224 ± 12	3595			
		oct. 07 - sept. 08	10	252 ± 14	105 ± 2,7 et 92 ± 5	3480 - 3670			
		sept. 08 - sept. 09	5	133 ± 29	76 ± 20 et 25 ± 4,5	3460 - 3610			
Aiguilles d'Entrèves (face W) 3490-3600 m	21 500	juil. 05 - juil. 06	0	/	/	/	0,42	0	0,42
		juil. 06 - oct. 06	1	6 ± 2	6 ± 2	3575			
		oct. 06 - oct. 07	1	27 ± 1	27 ± 1	3520			
		oct. 07 - sept. 08	0	/	/	/			
		sept. 08 - sept. 09	1	2 ± 0,01	2 ± 0,01	3555			
Grand Flambeau (face W) 3390-3559 m	16 500	juil. 06 - juil. 07	2	63 ± 3	57 ± 3 et 6 ± 0,3	3430 - 3500	1,3	0	1,3
		juil. 07 - sept. 09	0	/	/	/			
Grand Flambeau (face SE) 3350-3559 m	28 000	juil. 06 - juil. 07	2	181 ± 8	166 ± 8 et 15 ± 0,3	3455 - 3490	0,57	2,0	2,5
		juil. 07 - sept. 09	2	2 ± 0,1	31 ± 2 et 2 ± 0,1	3415 - 3425			
Aiguille Blanche de Peuterey (face N) 3960-4112 m	10 000	oct. 05 - juin 06	2	4 ± 0,4	3 ± 0,2 et 1 ± 0,2	4090 - 4100	6,3	0	6,3
		juin 06 - oct. 06	8	115 ± 5	75 ± 2,5 et 26 ± 1,5	3970 - 4030			
		oct. 06 - oct. 07	2	8 ± 1	4 ± 0,7 et 4 ± 0,3	3960 - 3965			
Piliers du Frêne (face SE) 3900-4243 m	95 000	juil. 05 - juin 06	0	/	/	/	0,03	0	0,03
		juin 06 - oct. 06	1	4 ± 0,7	4 ± 0,7	4155			
		oct. 06 - oct. 07	1	2 ± 0,4	2 ± 0,4	4120			
Grand Pilier d'Angle (face S) 3950-4611 m	40 000	oct 05 - juin 06	1	7 ± 0,6	7 ± 0,6	4165	0,12	0	0,12
		juin 06 - oct. 06	0	/	/	/			
		oct. 06 - oct. 07	1	3 ± 0,4	3 ± 0,4	4130			
Total	423 500	juil. 05 - sept. 09	66	2223 ± 135	426 ± 13 et 313 ± 19	3320 - 4165	0,76	0,85	1,6

Tableau 1 - Caractéristiques des détachements rocheux (> 1 m³) relevés entre 2005 et 2009 (2 223 m³ de roche au total) à partir de la comparaison de modèles 3D acquis par laserscanning terrestre dans le massif du Mont Blanc, et taux linéaire d'érosion associé.

Voisine de la face est de la Tour Ronde, la face ouest des Aiguilles d'Entrèves est caractérisée par une morphodynamique différente : entre juillet 2006 et septembre 2009, elle n'a en effet été affectée que par trois petits détachements (2 à 27 m³).

Trois campagnes de mesures ont été menées au Grand Flambeau. Elles ont permis deux comparaisons de modèles pour les faces ouest et sud-est. Six détachements y ont été enregistrés entre 2006 et 2009, avec un volume rocheux total de 277 m³.

Quatre campagnes de mesures ont été conduites entre 2005 et 2007 sur la face nord de l'Aiguille

Blanche de Peuterey. Les trois comparaisons ont révélé 12 chutes de blocs ou éboulements, avec un volume total de 127 m³. Seuls deux détachements ont un volume supérieur à 4 m³. L'été 2006 a été de loin le plus actif.

Trois comparaisons ont enfin été menées au Grand Pilier d'Angle et aux Piliers du Frêne. Entre 2005 et 2007, deux détachements ont été identifiés dans chacun de ces deux secteurs (volume total de 6 et 10 m³, respectivement), ce qui témoigne de la remarquable stabilité de ces secteurs de très haute altitude (3950-4611 m).

2 - Des taux d'érosion très variables

Les parois suivies par TLS affichent des dynamiques gravitaires très contrastées (Tableau 1), avec des taux d'érosion annuels (calculés à partir des surfaces des parois mesurées sous Polyworks, ils intègrent l'ensemble des volumes détachés supérieurs à 1 m³) allant de 0,03 (Piliers du Frêne) à 6,3 mm/an (Blanche de Peuterey). Ces deux valeurs concernent les parois suivies les plus élevées, d'orientation différente : les Piliers du Frêne sont orientés sud-est,

tandis que le secteur étudié de l'Aiguille Blanche de Peuterey est orienté nord. Dans cette face d'extension réduite, le taux très élevé est dû aux éboulements et chutes de blocs. Les trois parois qui ont été le lieu d'écroulements (face ouest des Drus, face est de la Tour Ronde et face SE du Grand Flambeau) montrent des taux similaires de l'ordre de 2,0 mm/an.

Le taux de retrait moyen induit par les éboulements et chutes de blocs pour l'ensemble des faces suivies est grossièrement équivalent à celui lié aux écroulements.

III - DISCUSSION SUR L'ORIGINE D'UNE ACTIVITÉ GÉOMORPHOLOGIQUE VARIABLE MAIS SOUVENT INTENSE

La comparaison diachronique des modèles 3D acquis ces dernières années sur les neuf parois du massif du Mont Blanc suggère que leur morphodynamique dépend très probablement des conditions géologiques, topo-climatiques et d'englacement de ces parois (Fischer *et al.*, 2006). Un modèle de distribution des températures de surface (TEBAL ; Gruber *et al.*, 2004a ; Ravelin *et al.*, 2010) suggère que l'ensemble des parois suivies sont affectées par le permafrost. Celui-ci est « tempéré » (température moyenne annuelle de surface supérieure à -5°C) dans l'ensemble des parois suivies sauf aux Piliers du Frêne, Grand Pilier d'Angle et Aiguille blanche de Peuterey où il est « froid » (température moyenne annuelle de surface inférieure à -5°C). Des mesures de températures de surface effectuées depuis 2005 au niveau d'une partie des parois suivies confirment le caractère froid ou

tempéré du permafrost des parois considérées.

Si la présence de glace permet une cohésion de la roche malgré ses discontinuités (Cruden, 2003), la dégradation actuelle du permafrost – son réchauffement, en surface essentiellement mais également en profondeur – constitue un facteur majeur d'instabilité des parois rocheuses de haute montagne (Gruber et Haeberli, 2007). Cette section discute de ce facteur.

Avec quatre chutes de blocs d'un volume de 2 à 7 m³, les Piliers du Frêne et le Grand Pilier d'Angle apparaissent stables. Ces secteurs se développent entre 3900 et 4600 m d'altitude, des altitudes élevées qui permettent la conservation d'un permafrost froid malgré une orientation globalement sud. Les températures très basses de ce permafrost pourraient expliquer cette stabilité. En revanche, bien que située entre 4000 et 4100 m d'altitude, la petite face nord de l'Aiguille

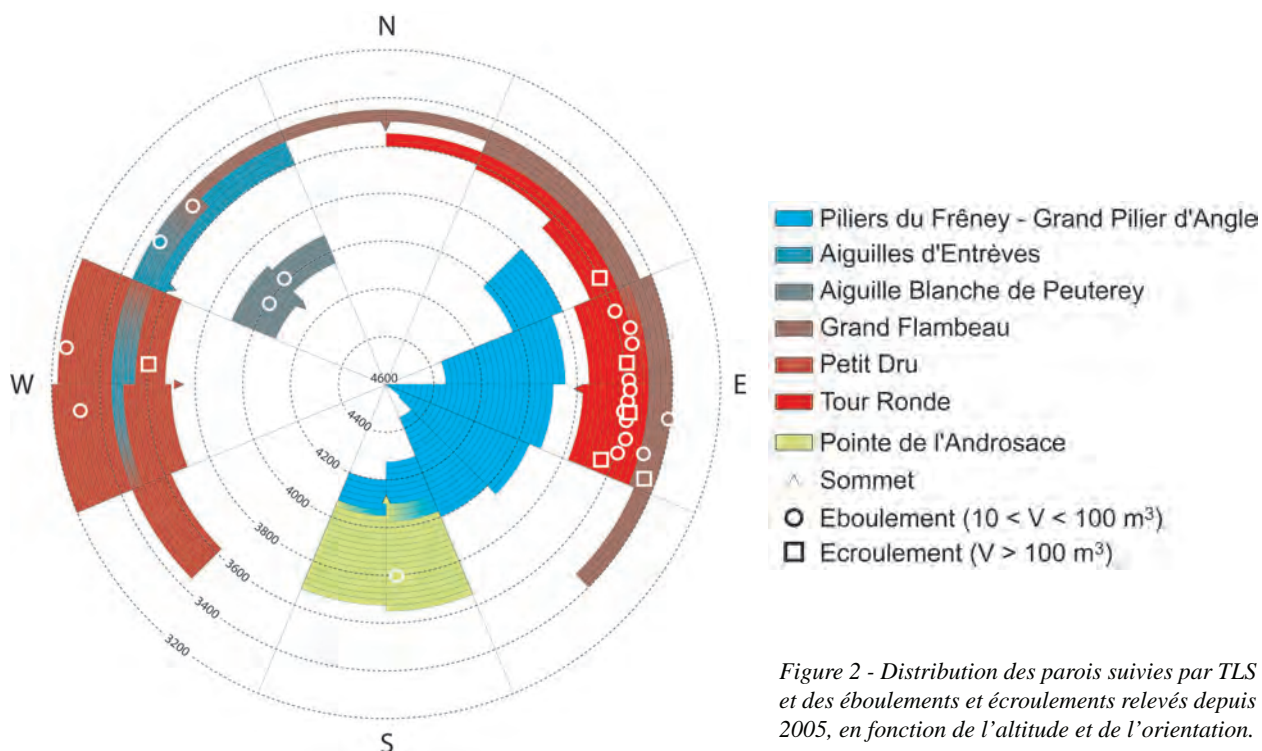


Figure 2 - Distribution des parois suivies par TLS et des éboulements et écroulements relevés depuis 2005, en fonction de l'altitude et de l'orientation.

Blanche de Peuterey est beaucoup plus active, avec 10 chutes de blocs et 2 éboulements entre 2005 et 2007. Cette activité résulte vraisemblablement du contexte géologique (compartiments rocheux sans butées) et explique le très fort taux linéaire d'érosion calculé (6,3 mm/an).

Les parois rocheuses situées en dessous de 3800 m, à permafrost plus tempéré qu'à très haute altitude, connaissent une morphodynamique plus intense (Figure 2), même si elle est très contrastée selon, notamment, la géologie et l'englacement. Dépourvue de couverture glacio-nivale, la face ouest des Aiguilles d'Entrèves, pourtant raide et assez densément fracturée, a ainsi été très stable au cours de la période 2005-2009 en raison de l'orientation et du pendage des fractures, généralement défavorables aux déstabilisations. Au contraire, la face est de la Tour Ronde et l'Arête Freshfield ont été affectées par quatre écroulements pendant cette période : ceux qui ont affecté le très compact éperon Bernezat entre 2005 et 2006 pourraient résulter de la dégradation du permafrost, comme le

suggèrent leurs volume et profondeur (jusqu'à 4,2 m), qui aurait entraîné un approfondissement de la couche active (Gruber *et al.*, 2004b). Les autres écroulements de la Tour Ronde résulteraient de la forte réduction de la couverture glacio-nivale depuis deux décennies – identifiée en particulier par la comparaison de photographies –, qui permet la formation d'une couche active.

Les éboulements et écroulements dans la face ouest du Petit Dru entre octobre 2005 et octobre 2006 témoignent quant à eux probablement d'un ajustement mécanique après le grand écroulement de juin 2005 (265 000 m³ ; Ravanel et Deline, 2008). Ainsi, l'éboulement de 84 m³ entre octobre 2005 et octobre 2006 correspond à la chute d'un bloc individuel surplombant, en équilibre précaire depuis juin 2005, tandis que les petits blocs ont probablement été déstabilisés lors de l'écroulement principal de cette période (426 m³). Depuis octobre 2006, l'activité est très réduite, ce qui suggère la relative stabilisation de cette paroi depuis l'écroulement de juin 2005.

CONCLUSION

Depuis 2005, les neuf parois du massif du Mont Blanc suivies par TLS ont fait l'objet de deux à cinq campagnes de mesure. Les 43 modèles 3D qui ont ainsi été acquis ont permis 29 comparaisons diachroniques qui ont identifié 66 détachements d'un volume supérieur à 1 m³, avec un volume total de 2223 m³. La fréquence et l'intensité de ces détachements varient considérablement d'une paroi à l'autre, depuis des secteurs de très haute altitude dont le permafrost froid permet vraisemblablement la stabilité jusqu'à la face

est de la Tour Ronde dont la morphodynamique active résulte probablement de la conjonction de plusieurs facteurs : densité élevée de fractures (au moins pour sa moitié sud), couverture glacio-nivale en régression, et permafrost tempéré.

Ainsi, en nous renseignant sur le volume et le rythme des écroulements grâce, respectivement, à sa précision et à sa reproductibilité, la méthode TLS permet d'éclaircir certaines des conditions de leur déclenchement.

Remerciements

Cet article constitue une contribution au projet PermaNET, financé par le programme de Coopération Territoriale Européenne Espace Alpin (2007-2013) de l'Union Européenne. Les auteurs remercient chaleureusement Xavier Bodin et Antoine Rabatel pour leurs relectures.

BIBLIOGRAPHIE

- ABELLÁN A., VILAPLANA J.M., MARTINEZ J., 2006. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 88, 136-148.
- CRUDEN D.M., 2003. The shapes of cold, high mountains in sedimentary rocks. *Geomorphology*, 55, 249-261.
- FISCHER L., KÄÄB A., HUGGEL C., NOETZLI J., 2006. Geology, glacier changes, permafrost and related slope instabilities in a high-mountain rock wall: Monte Rosa east face, Italian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 761-772.
- GRUBER S., HAEERLI W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, DOI: 10.1029/2006JF000547.
- GRUBER S., HÖELZLE M., HAEERLI W., 2004a. Rock-wall temperatures in the Alps: modelling their topographic distribution and regional differences. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, 299-307.
- GRUBER S., HÖELZLE M., HAEERLI W., 2004b. Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, 31: L13504, DOI: 10.1029/2004GL020051.

- OPPIKOEFER T., JABOYEDOFF M., KEUSEN H.R., 2008. Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps. *Nature Geoscience*, 1, 531-535.
- RABATEL A., DELINE P., JAILLET S., RAVANEL L., 2008. Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial LiDAR measurements: a case study in the Mont-Blanc area. *Geophysical Research Letter*, 35, L10502, DOI: 10.1029/2008GL033424.
- RAVANEL L., DELINE P., 2008. La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du Petit Age Glaciaire. *Géomorphologie*, 4, 261-272.
- RAVANEL L., DELINE P., 2011. Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, DOI: 10.1177/0959683610374887.
- RAVANEL L., ALLIGNOL F., DELINE P., GRUBER S., RAVELLO M., 2010. Rockfalls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. *Landslides*, 7, 493-501, DOI: 10.1007/s10346-010-0206-z.

APPORT DES DONNÉES DE LIDAR TERRESTRE POUR LE SUIVI ET L'ANALYSE DU DÉPLACEMENT D'UN GLACIER ROCHEUX

- GLACIER DU LAURICHARD, HAUTES ALPES, FRANCE -

CONTRIBUTION OF TERRESTRIAL LiDAR DATA
TO THE SURVEY AND ANALYSIS OF ROCK GLACIER DISPLACEMENT
- LAURICHARD GLACIER, HAUTES ALPES, FRANCE -

XAVIER BODIN

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73360 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

Contact : xavier.bodin@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

Les glaciers rocheux sont une forme fréquente dans les montagnes peu ou pas englacées. Leur morphologie reflète la déformation du mélange de glace et de débris dont ils sont constitués, et leur réaction face aux changements climatiques pose question. Dans un contexte récent où des déstabilisations voire des effondrements de glaciers rocheux ont été observés, l'écoulement du permafrost riche en glace sur les versants est l'objet d'études et de suivis afin, entre autres, d'anticiper certaines situations à risque.

Cet article présente les principaux résultats de l'analyse de deux relevés par LiDAR terrestre du glacier rocheux de Laurichard (Hautes Alpes, France), effectués à un an d'intervalle (2005-2006). Cette technique a permis d'acquérir, à une résolution sub-décimétrique, des modèles de la surface du glacier rocheux, qui ont ensuite été comparés entre eux au travers de deux approches complémentaires, dans le but : i) d'extraire la micro-topographie ; ii) de quantifier les changements inter-annuels ; iii) de déterminer les principales caractéristiques du mouvement du glacier rocheux. Par ailleurs, les données LiDAR ont également été confrontées avec deux autres sources de données topographiques, un modèle numérique de terrain de 1975 et des données de positionnement de blocs suivis annuellement depuis plus de deux décennies.

MOTS-CLÉS : PERMAFROST DE MONTAGNE, GLACIER ROCHEUX, LiDAR TERRESTRE, MORPHOLOGIE, CINEMATIQUE DE SURFACE.

ABSTRACT

Rock glaciers are a common landform in mountain areas with few or no glacier, which morphology reflects the deformation of an ice and debris mixture, and which response to climate changes raises many questions. Indeed, in a recent context of observed rock glacier destabilization or even collapse, the flow of the ice-rich permafrost on slope is the subject of various studies and surveys, especially with respect to the natural hazard they might represent.

This paper presents the main results of the analysis of two terrestrial LiDAR surveys of the Laurichard rock glacier (French Alps), performed at a one year time lapse (2005-2006). This technique has allowed to acquire, at a sub-decimeter resolution, models of the rock glacier surface, which have been afterward compared together through two complementary approaches, in order i) to extract the small scale topography; ii) to quantify the inter-annual surface changes; iii) to determine the main characteristics of the rock glacier flow. The LiDAR-derived datasets were also compared to a digital terrain model of 1975 and to a geodetic datasets of annual block position.

KEYWORDS: MOUNTAIN PERMAFROST; ROCKGLACIER, TERRESTRIAL LiDAR, MORPHOLOGY, SURFACE KINEMATICS.

INTRODUCTION

Les glaciers rocheux sont une forme typique des hautes montagnes affectées par la présence de permafrost discontinu (Haeberli *et al.*, 2006) dans les secteurs pas ou peu englacés. Ces accumulations détritiques riches en glace, en se déformant sur les versants, acquièrent une morphologie caractéristique, révélatrice de l'écoulement visco-plastique, lent et relativement constant, du mélange débris/glace (Barsch, 1996). Réponse possible à l'augmentation des températures du sol observée dans certains forages (PERMOS, 2010), les modifications de la dynamique et de la morphologie des glaciers rocheux observées récemment (Bodin *et al.*, 2009 ; Käab *et al.*, 2007 ; Kaufmann *et al.*, 2006 ; Krysiński *et al.*, 2010 ; Roer *et al.*, 2008) pourraient être à l'origine de phénomènes hydro-géomorphologiques (tassement du sol, glissement, effondrement, lave torrentielles) potentiellement dommageables pour les activités humaines (Harris *et al.*, 2001).

Toutefois, la dynamique des glaciers rocheux est généralement étudiée à l'aide de mesures ponctuelles (GPS ou théodolite), qui ne permettent pas de réaliser des analyses spatialisées et limitent par conséquent la caractérisation des mouvements et de la rhéologie. À l'opposé, les méthodes de télédétection comme la pho-

togrammètrie (Käab, 2005) ou l'interférométrie radar (Strozzi *et al.*, 2004), si elles offrent une bonne résolution spatiale, ne permettent pas toujours une répétition des mesures suffisante pour quantifier des mouvements souvent inférieurs à quelques décimètres par an. À ce titre, la technologie LiDAR (*Light Detection And Ranging*), par la combinaison d'une mise en œuvre relativement aisée, et donc répétable à intervalles réguliers, et d'une très bonne résolution spatiale, constitue un outil intéressant, qui a pour l'instant été peu exploité (Avian *et al.*, 2009).

C'est dans l'idée de combler cette lacune que des relevés par *laserscanning* terrestre ont été entrepris sur le glacier rocheux de Laurichard (Hautes Alpes, France) en 2005 et 2006. Les objectifs étaient de : (i) tester l'applicabilité de cet outil sur des objets rugueux et complexes tels que des glaciers rocheux ; (ii) lever un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) à haute résolution du glacier rocheux ; (iii) déterminer avec précision les mouvements de la surface entre les deux dates de mesures. Par ailleurs, les données LiDAR ont été comparées à un MNA plus ancien (1975) et à une série de mesures topographiques de déplacement de surface annuelle (actif depuis 1979).

I - MÉTHODOLOGIE

1 - Dispositif et plan de scan

Dans cette étude, nous avons utilisé un LiDAR terrestre *Ilris-3D (Optech)*, qui utilise une longueur d'onde de 1500 nm, et bénéficie d'une portée maximale de l'ordre de 800 m, d'une précision annoncée de 8 mm à 100 m et d'une capacité d'acquisition de 2000 points par seconde. La très forte rugosité de la surface du glacier rocheux, la configuration topographique du terrain, la portée de l'appareil et son angle de balayage ont justifié de multiplier les scènes en les relevant depuis plusieurs stations.

Le glacier rocheux a ainsi été scanné depuis quatre stations, ayant permis d'acquérir 17 scènes en septembre 2005 et 16 en septembre 2006, soit 10 à 15 millions de points au total avec une distance moyenne entre deux points de 0,07 m. Sept blocs marqués (croix peintes) et mesurés avec un GPS mono-fréquence (*Ashtec ProMark III, Thalès Navigation*) au moment des campagnes ont servi de points de référence pour localiser les nuages de points dans le système de projection Lambert 3 (Figure 1).

La disponibilité restreinte de lieux pour positionner l'appareil sur des sites surplombant suffisamment la forme a limité quelque peu la couverture globale du glacier rocheux et complexifié le traitement ultérieur des

données. Au final, la densité des nuages de points varie selon la distance et le recouvrement entre les scènes, et certains secteurs, tels que le pied du talus frontal ou les dépressions entre les rides de fluage, très encaissées ou quasiment parallèles aux visées du LiDAR, n'ont pas, ou ont peu été couverts, alors que d'autres, tels que les bords du glacier rocheux, ont en revanche été densément scannés.

2 - Traitement des données

Pour chacun des jeux de données recueillis par *laserscanning* terrestre, en 2005 et en 2006, le traitement des données a consisté à (i) générer un modèle polygonal géoréférencé à partir des nuages de points, (ii) créer un Modèle Numérique d'Altitude à haute résolution (MNA-hr) et en extraire des données topométriques, et enfin (iii) comparer les données entre elles de façon à quantifier les modifications.

a - Calage des nuages de points et génération d'un modèle polygonal

Le traitement initial des données s'est effectué sur une station de travail équipée de la suite logicielle

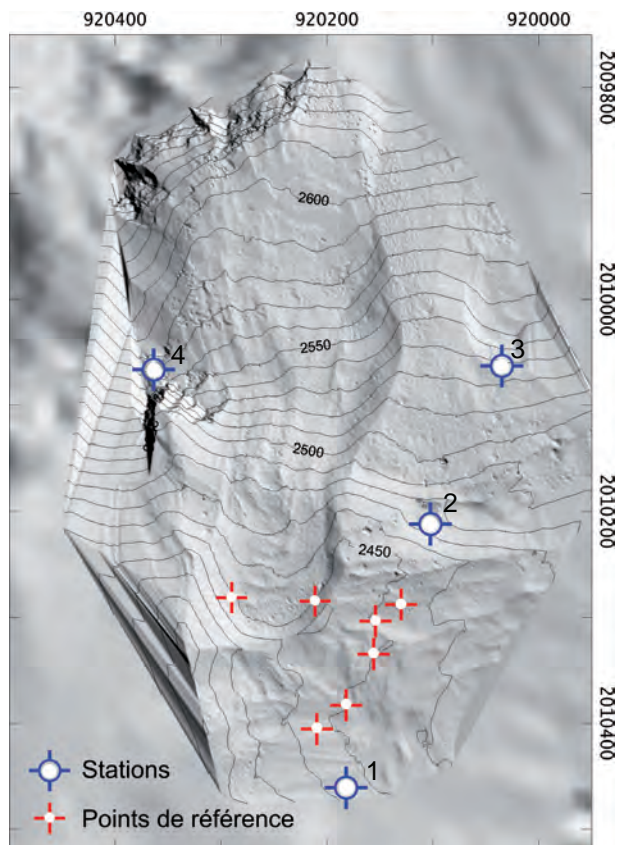


Figure 1 - Relief ombré du glacier rocheux de Laurichard sur la base du MNA haute résolution issu du relevé par laserscanning terrestre 2005. Le fond de carte est le relief ombré du secteur issu du MNA à 10 m provenant de la digitalisation des courbes de niveau de la carte topographique 1/25 000 IGN. Sont également indiqués les 4 stations de scan et les points de référence. Coordonnées métriques en système Lambert 2 étendu.

PolyWorks (Innometric), qui permet l'alignement des scènes acquises sur le terrain et la génération de modèles polygonaux et de *MNA-hr*. La chaîne de traitements comprend successivement :

- 1 – l'alignement et l'ajustement des scènes à partir des zones de recouvrement communes ;
- 2 – la réduction de recouvrements qui permet d'éliminer les informations redondantes ;
- 3 – le maillage du nuage de points pour aboutir à un modèle polygonal ;
- 4 – le lissage et la décimation qui réduisent la taille du modèle polygonal ;
- 5 – le géoréférencement du modèle polygonal de 2005 (meilleure couverture que les données de 2006) ;
- 6 – le calage fin du modèle 2006 sur le modèle 2005 géoréférencé à partir des zones stables (terrain non mobile).

Un certain nombre de contraintes logistiques et techniques ont limité le travail :

- la rugosité et la complexité de la surface, souvent tangentielle aux visées du LiDAR ;

- la présence de neige sur la partie haute du glacier rocheux en septembre 2006, qui par ailleurs ne renvoie que peu de points au LiDAR du fait de sa position par rapport aux stations de visée ;
- les limites de l'alignement de scènes d'une même campagne, avec parfois un recouvrement trop faible entre les scènes. Ceci pose particulièrement problème pour l'alignement de scènes prises depuis les stations 1 et 4, qui concernent les faces opposées des blocs couvrant le glacier rocheux.

b - Génération des MNA et extraction de paramètres topographiques

Sous le logiciel *Surfer* (Golden Software), le *MNA-hr* issu du relevé de 2005 a permis, d'une part, de dresser une cartographie détaillée de la morphologie du glacier rocheux et, d'autre part, de calculer, à partir de deux profils topographiques (l'un longitudinal selon l'axe d'écoulement principal et l'autre oblique, sur la langue du glacier rocheux), les indices topométriques suivants :

– la pente : $\tan \alpha_n = \frac{z_{n-1} - z_n}{x_{n-1} - x_n}$

où α est l'angle que forme le terrain avec l'horizontale, z est l'altitude et x la distance horizontale le long du profil. Afin de donner une image moins bruitée par la présence de blocs grossiers, une valeur de pente lissée sur une portion de profil de 15 m est également fournie (moyenne mobile sur une fenêtre de 30 valeurs).

- la micro-topographie, inspirée de Kääb (2005) :

$$\mu z_n = \frac{\sum_{n+2}^{n-2} z_n}{5} - \frac{\sum_{n+25}^{n-25} z_n}{51}$$

Il s'agit de la différence entre l'altitude moyenne locale (sur une portion de 2,5 m de longueur) et l'altitude moyenne sur 25 m de profil. La taille des fenêtres de calcul tient compte des dimensions moyennes des éléments micro-topographiques à la surface du glacier rocheux et de l'orientation du profil par rapport à ces derniers.

– la rugosité :

$$\rho z_n = z_n - \frac{\sum_{n+10}^{n-10} z_n}{21}$$

Il s'agit de la différence entre l'altitude d'un point et l'altitude moyenne sur 10 m de profil. Cet indice, s'il est délicat à interpréter dans certains contextes topographiques (fortes pentes) et lorsque la couverture LiDAR est insuffisante, fournit néanmoins une approximation de la variabilité de la surface à l'échelle fine (dans tous les cas supérieure à la résolution du *MNA-hr*, qui est de 0,5 m).

c - Comparaison diachronique et mesures de déplacement

Pour des raisons d'homogénéité dans la qualité des données de base (présence de neige sur la partie haute du glacier rocheux en 2006), la comparaison des deux *MNA-hr* obtenus à un an d'intervalle s'est effectuée uniquement sur la langue du glacier rocheux, et ce selon deux approches :

- par des calculs de distances directionnelles (selon les axes x, y, z) entre les modèles polygonaux de 2005 et 2006 ;
- par des calculs de distances verticales et horizontales le long de profils extraits des *MNA-hr*.

Outre certaines restrictions liées à l'objet d'étude, aux données et aux outils logiciels, comme la difficulté de reconnaître les formes (blocs rocheux) ou de mettre en œuvre des procédures automatisées, la comparaison entre les données de 2005 et 2006 est restreinte par les limitations géométriques suivantes :

- la précision du géoréférencement d'un nuage de points à partir des points GPS dont la précision moyenne est $\pm 0,008$ m en altimétrie, $\pm 0,007$ m en planimétrie, dans le système de projection Lambert 2 ;
- la précision du recalage du nuage de points 2006 sur celui de 2005, avec une erreur moyenne 3D du nuage de points recalé, fournie par *PolyWorks* de $\pm 0,09$ m ($\sigma = 0,03$).

II - RÉSULTATS

1 - Analyse morphométrique et micro-topographique du glacier rocheux

a - Cartographie à haute résolution

A partir du MNA, représenté en relief ombré et en courbes de niveau, l'interprétation de la morphologie de surface permet de cartographier précisément les terrains concernés par le fluage de la glace sous-jacente formant le corps du glacier rocheux. Les surfaces constituées de blocs sans matrice (*openwork*), constituant la majeure partie de la couverture du glacier rocheux, se distinguent par ailleurs des secteurs à granulométrie plus fine de certains bourrelets de compression de la langue et de l'amont des talus latéro-frontaux.

Le *MNA-hr* vient également confirmer les observations de terrain concernant la présence possible de sous-unités distinctes du corps principal du glacier rocheux, dont il reste néanmoins délicat de préciser l'origine, purement dynamique ou reliée à des fluctuations climatiques. On trouvera en la carte détaillée dans Bodin 2007 (p. 127).

b - Indices topométriques et micro-topographiques

L'observation des valeurs de pente, des indices de micro-topographie et de rugosité calculés le long du profil longitudinal amène à distinguer différents tronçons (Figure 2), aux caractéristiques topométriques relativement homogènes, qui correspondent à des unités morphodynamiques particulières :

– le talus d'éboulis faisant la jonction entre la paroi et le glacier rocheux est marqué par la dynamique d'accumulation mixte, gravitaire et avalancheuse, avec une concavité distale assez prononcée, ainsi que par la dynamique de fluage, se traduisant par une concavité profonde au contact avec la paroi, et qui constitue en quelque sorte la « rimaye » du glacier rocheux ;

– la partie directement en amont de la forte pente centrale du glacier rocheux est constituée d'une surface peu rugueuse (sur le terrain, on observe effectivement une large proportion de blocs de diamètre inférieur à 40 cm), et sans micro-relief. La topographie est ici en réalité orientée longitudinalement, donc peu visible dans le profil, du fait de l'étirement que subit la zone ;

– cette unité affiche une rugosité calculée plus élevée, traduisant la présence abondante de blocs très grossiers (diamètre fréquemment $> 0,5$ m). La concavité générale de la section est combinée, vers sa partie inférieure, à l'apparition du couple morphologique bourrelet/sillon, exprimant clairement la dynamique compressive de cette portion du profil ;

– la topographie de la langue du glacier rocheux est dominée par la présence de bourrelets compressifs, bien traduite par les oscillations de l'indice de microtopographie. Les valeurs de rugosité présentent une variabilité moins élevée (en terme de fréquence, et non d'amplitude) que dans la section précédente et suggèrent la présence de matériaux moins grossiers.

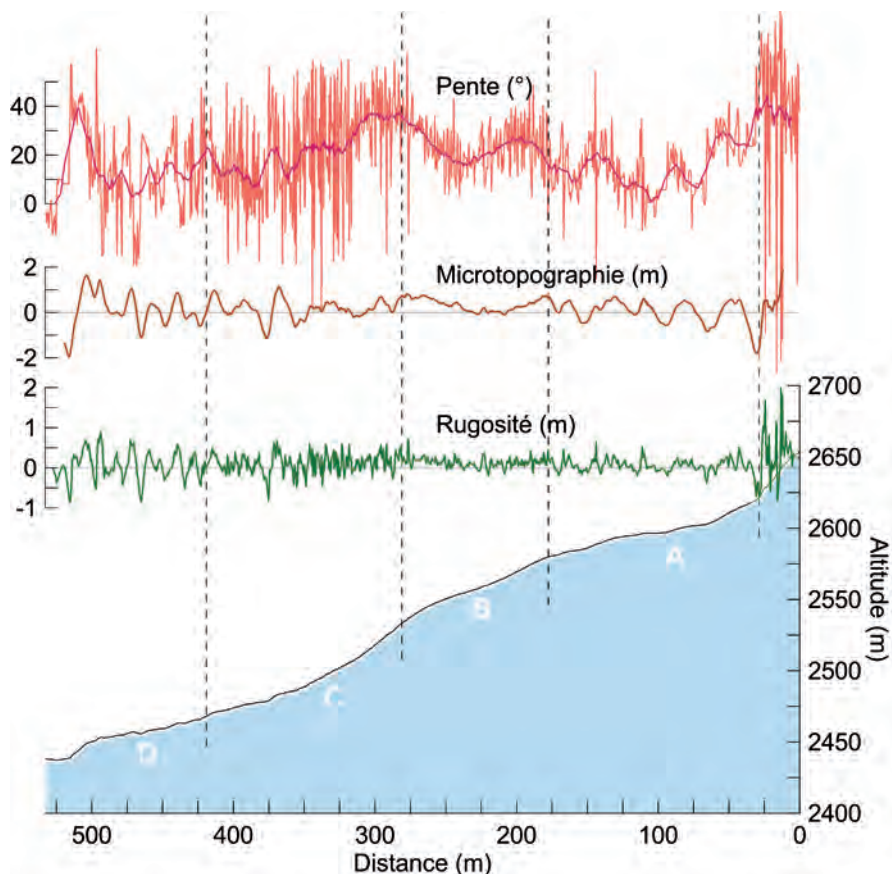
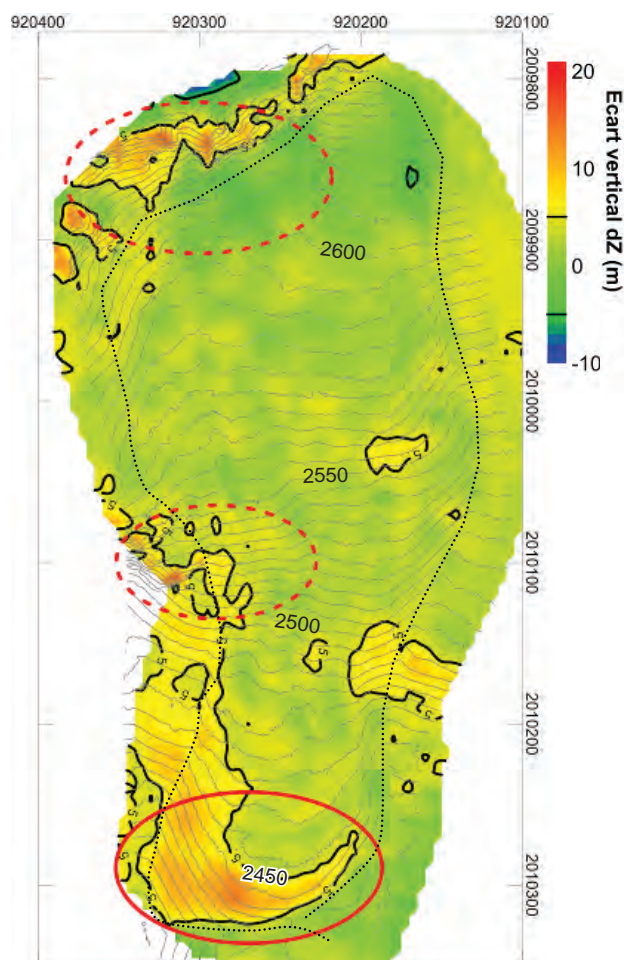


Figure 2 - Profil topographique en long du glacier rocheux de Laurichard et paramètres morphométriques issus du MNA haute résolution (LiDAR 2005). Les lettres correspondent aux sections décrites dans le texte.

2 - Modifications entre 1975 et 2005

Afin de quantifier les modifications du glacier rocheux au cours des trois dernières décennies, en s'affranchissant des contraintes liées à la rugosité du glacier rocheux, le MNA-hr de 2005 a été comparé au MNA10 réalisé à partir de la carte IGN 3436ET, réalisée à partir de photographies aériennes de 1975. Malgré l'imprécision élevée du MNA10 (estimée à ± 5 m), la durée de la période d'observation offre la possibilité d'évaluer les caractéristiques de la progression du glacier rocheux (Figure 3).

Figure 3 - Changements topographiques verticaux (exprimés en m, avec une marge d'erreur à ± 5 m) du glacier rocheux de Laurichard (entouré en pointillés noirs) entre le MNA haute résolution (LiDAR 2005) et le MNA10 issu de la digitalisation des courbes de niveau de la carte topographique IGN 3436ET (1975). La gamme des écarts compris entre -5 et 5 m est considérée comme correspondant à la marge d'imprécision du MNA10. Les secteurs entourés en trait tireté correspondent aux artefacts liés à la raideur des pentes rocheuses et le secteur entouré en trait plein à l'avancée du glacier rocheux (inflexion sur sa droite).



3 - Comparaison inter-annuelle des MNA (2005-2006)

a - Modifications de la surface du glacier rocheux

Du fait de la rugosité pluri-décimétrique de la surface de la langue du glacier rocheux, les comparaisons entre les données 2005 et 2006 par *PolyWorks* se sont limitées à des calculs de distance tri-dimensionnelle et directionnelle. Ceci a permis de confirmer des valeurs proches de celles du suivi géodésique (aux alentours de 0,5 m/an) dans les secteurs situés autour des blocs suivis, et d'observer les conséquences de certains événements ponctuels, comme par exemple la chute d'un bloc métrique, depuis la couronne frontale, au pied du talus latéro-frontal du flanc gauche du glacier rocheux (Bodin *et al.*, 2008).

Les modèles polygonaux de 2005 et 2006 ont par ailleurs été comparés par le biais des différences verticales (dZ) calculées sur 14 profils, 6 longitudinaux, 6 transversaux et 2 obliques (par rapport à l'axe d'écoulement général du glacier rocheux).

Les profils longitudinaux (Figure 4) permettent d'observer :

- des secteurs (entourés en tiretés orange ; dZ proche de 0) correspondant aux terrains stables à l'extérieur du glacier rocheux ;

- un secteur (entouré en tiretés noirs ; $dZ < 0$) correspondant à l'érosion de la partie supérieure du talus frontal ;

- un secteur (ellipse noire) qui correspond à la translation horizontale de quelques décimètres d'une succession de bourrelets et de sillons transverses.

Les profils transversaux et obliques confirment la dynamique générale de la langue du glacier rocheux, détectée par la comparaison du *MNA-hr* et du *MNA10*, à savoir qu'une partie de la progression de la forme s'effectue non pas dans l'axe d'écoulement principal mais sur sa droite.

b - Avancée du glacier rocheux

L'ensemble des profils topographiques donne une image intéressante des modalités de l'étalement frontal et latéral du glacier rocheux. Rejoignant les observations de divers auteurs (voir par ex. Wahrhaftig et Cox, 1959 ; Haeberli, 1985 ; Käab et Reichmuth, 2005), le profil vertical de vitesse montre des valeurs qui sont maximales en surface (entre 0,7 et 0,3 m/an), et décroissantes vers le bas du talus latéro-frontal (valeurs inférieures à 0,1 m/an). Son allure exponentielle suggère une progression du glacier rocheux par « *overriding* », c'est-à-dire par le chevauchement puis l'incorporation des matériaux de surface tombés au pied du talus latéro-frontal.

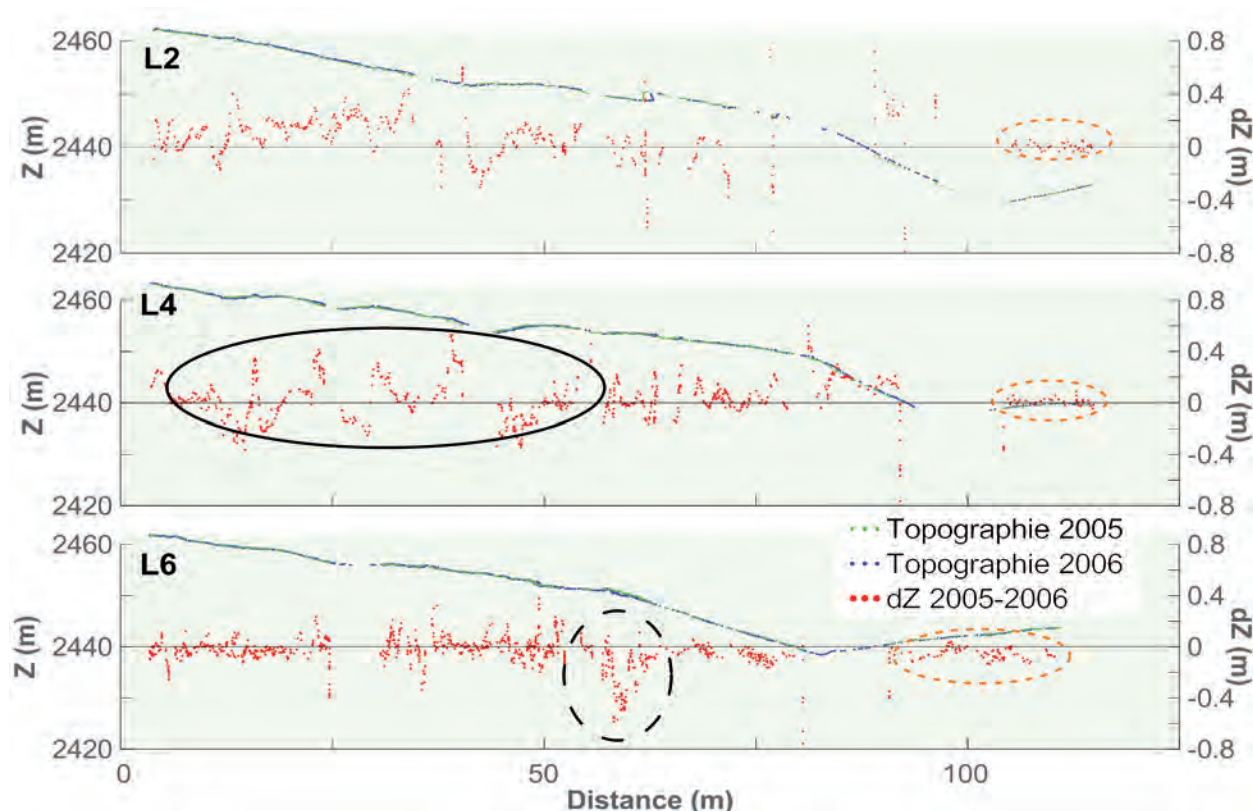


Figure 4 - Comparaison de trois profils longitudinaux à partir des modèles polygonaux 2005 et 2006 sur la langue du glacier rocheux de Laurichard, avec $dZ = Z_{2005} - Z_{2006}$

III - DISCUSSION : DE NOUVELLES CLÉS POUR ÉTUDIER ET SUIVRE LA DYNAMIQUE DES GLACIERS ROCHEUX

Pour vérifier l'hypothèse soulevée par l'analyse des données acquises par *laserscanning* terrestre, selon laquelle l'écoulement du glacier rocheux de Laurichard dévie sur sa droite au niveau de la langue (Figure 5 a), une ligne (ligne O) de blocs marqués, oblique par rapport à l'axe longitudinal (ligne L), a été mise en place en 2008. Les données recueillies depuis sont venues confirmer que des déplacements compris entre 0,9 et 1,4 m/an et dans une direction nettement distincte de l'axe principal se produisent le long de la ligne O,

tandis que le bord droit du glacier rocheux est affecté de mouvements inférieurs compris entre 0,2 et 0,7 m/an (Figure 5 b).

Ces observations permettent donc de préciser les caractéristiques spatiales de l'écoulement du glacier rocheux, et montrent que l'interprétation des données antérieures obtenues par suivi géodésique (Francou et Reynaud, 1992) doit prendre en compte une dynamique plus complexe que l'hypothèse initiale d'un écoulement le long de l'axe principal du glacier rocheux.

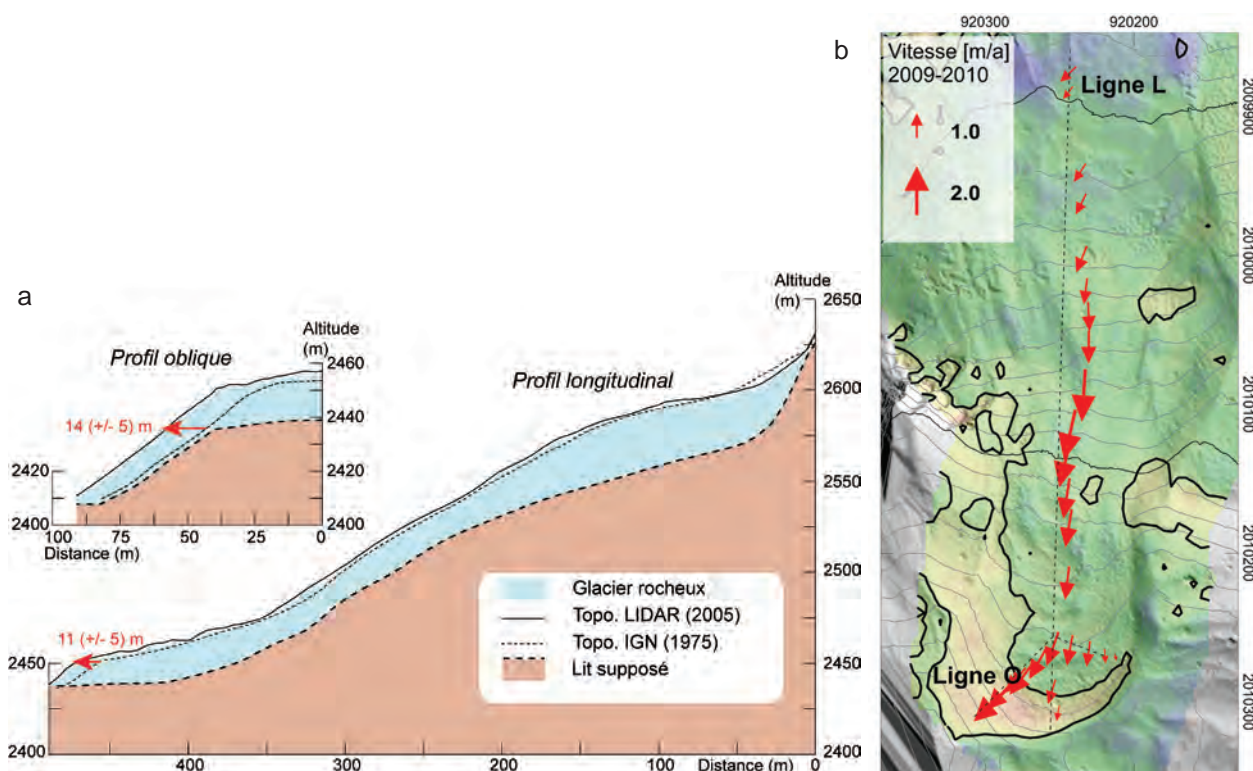


Figure 5 - a) Modification du profil topographique du glacier rocheux d'après le MNA10 (1975) et le MNA-hr (2005), le long de son axe longitudinal et en travers du rebord droit de sa langue (profil oblique) ; les flèches indiquent l'avancement total mesuré entre les deux dates, en mètres ;

b) Vitesse de déplacement mesurée par géodésie entre 2009 et 2010 le long des mêmes axes (longitudinal, ligne L, et oblique, ligne O), avec en fond la différence verticale mesurée entre 1975 et 2005 et en trait noir épais, l'isoligne $dZ = 5m$ (cf. Fig. 3).

CONCLUSION

Réalisées à une année d'intervalle, les mesures par LiDAR terrestre de la surface du glacier rocheux de Laurichard apportent des données très fines et denses sur ses caractéristiques morphologiques et rhéologiques. L'étalement de la langue du glacier rocheux apparaît ainsi nettement, avec une diver-

gence de l'écoulement qui, d'une part, forme un lobe caractéristique, et, d'autre part, est fortement dévié sur sa droite. Le croisement des données de *laserscanning* terrestre avec d'autres sources de topographie de la surface du glacier rocheux appuie également cette vision, que sont récemment venues

confirmer des mesures géodésiques supplémentaires.

Cette méthode s'avère donc pertinente et pourrait, à terme, être employée régulièrement (tous les 4-5 ans) pour mesurer précisément la cinématique du glacier rocheux et d'autres accumulations riches en glace. Le LiDAR constitue en outre un complé-

ment à d'autres approches topographiques ou par télédétection, tant pour améliorer notre compréhension des mécanismes de déformation et d'écoulement des sols gelés, que pour le suivi du pergélisol sur le long terme dans le contexte actuel du réchauffement climatique.

Remerciements

L'auteur remercie S. Jaillet, A. Rabatel, P. Schoeneich, J.M. Krysiecki et R. Delunel pour l'aide sur le terrain pour l'acquisition des données LiDAR en 2005 et 2006. E. Thibert et M. Bouvier ont fourni, via le Parc National des Ecrins, les données du suivi géodésique annuel du glacier rocheux de Laurichard. Enfin, S. Aubert et P. Choler ont gracieusement mis à notre disposition le Chalet-laboratoire du col du Lautaret.

BIBLIOGRAPHIE

- AVIAN M., KELLERER-PIRKLBAUER A., BAUER A., 2009. LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Nat. Hazards Earth Syst.*, 9, 1087-1094.
- BARSCHE D., 1996. Rock glaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Springer, Berlin, 331 p.
- BODIN X., 2007. Géodynamique du pergélisol alpin : fonctionnement, distribution et évolution récente. L'exemple du massif du Combeynot (Hautes Alpes, France). Thèse de doctorat, Université Denis-Diderot, Paris, 274 p.
- BODIN X., JAILLET S. & SCHOENEICH P., 2008. High resolution DEM extraction from Terrestrial LIDAR topometry and surface kinematics of the creeping Alpine permafrost: the Laurichard rockglacier case study (French Southern Alps). University of Alaska, Fairbanks, Proc. of the Ninth Int. Conf. on Permafrost, 1, 137-142.
- BODIN X., THIBERT E., FABRE D., RIBOLINI A., SCHOENEICH P., FRANCOU B., REYNAUD L., FORT M., 2009. Two decades of responses (1986-2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 331-344. DOI: 10.1002/ppp.665.
- FRANCOU B., REYNAUD L., 1992. Ten years of surficial velocities on a Rock glacier (Laurichard, French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, 209-213. DOI: 10.1002/ppp.3430030306.
- HAEBERLI W., 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. Zürich, ETH, 142 p.
- HAEBERLI W., HALLET B., ARENSEN L., ELCONIN R., HUMLUM O., KÄÄB A., KAUFMANN V., LADANYI B., MATSUOKA N., SPRINGMAN S., VONDER MÜHLL D., 2006. Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 189-214. DOI: 10.1002/ppp.561.
- HARRIS C., DAVIES M., ETZELMÜLLER B., 2001. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 145-156. DOI: 10.1002/ppp.376.
- KÄÄB A., 2005. Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. *Schriftenreihe Physische Geographie Glaziologie und Geomorphodynamik*, Zurich, 48, 466 p.
- KÄÄB A., REICHMUTH T., 2005. Advance mechanisms of rock glaciers. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16, 187-193. DOI: 10.1002/ppp.507.
- KÄÄB A., FRAUENFELDER R., ROER I., 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56, 172-187. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.005.
- KAUFMANN V., LADSTÄDTER R., LIEB G., 2006. Quantitative Assessment of the Creep Process of Weissenkar Rock Glacier (Central Alps, Austria). *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 41, 77-86.
- KRYSIECKI J.M., LE ROUX O., BODIN X., SCHOENEICH P., 2010. State and evolution of the Bérard rock glacier (Southern French Alps) after its collapse in 2006: insights from geophysical, geodetic and thermal datasets. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-13932-3.
- PERMOS 2010. Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008. Noetzli, J. and Vonder Muehll, D. (eds.). The Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, *Glaciological Report (Permafrost)*, 8/9, 68 p.
- ROER, I., HAEBERLI, W., AVIAN, M., KAUFMANN, V., DELALOYE, R., LAMBIEL, C., KÄÄB, A., 2008. Observations And Considerations On Destabilizing Active Rockglaciers In The European Alps, in Ninth International Conference on Permafrost, edited by Kane D.L. and Hinkel K.M. Institute of Northern Engineering, University of Alaska at Fairbanks, 1, 1505-1510, 2008.
- STROZZI T., KÄÄB A., FRAUENFELDER R., 2004. Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. *Int. J. Remote Sensing*, 25: 2919-2931.
- WAHRHAFTIG C., COX A., 1959. Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin*, 70, 383-436, DOI:10.1130/0016-7606(1959)70[383:RGITAR]2.0.CO;2

CONSOLIDATION PAR OPTIMISATION EN VUE D'UNE ANALYSE DIACHRONIQUE PAR SCANNER LASER TERRESTRE DE LA FALAISE DE GLACE DU LAC DU MIAGE MASSIF DU MONT BLANC

*REGISTRATION BY OPTIMIZATION FOR A DIACHRONIC ANALYSIS BY TERRESTRIAL LASER SCANNER
OF THE MIAGE LAKE ICE CLIFF (MONT BLANC MASSIF)*

CHARLES GRANGE^{1,2}, THIERRY VILLEMIN², STÉPHANE JAILLET²,
PHILIP DELINE², ESTELLE PLOYON², ANDREA TAMBURINI³

¹ Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 24 bd de la Victoire, 67084 Strasbourg cedex, France

² Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, 73360 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

³ Imageo S.r.l., Via Valperga Caluso, 35, 1012 Torino, Italie.

Contact : charles.grange@insa-strasbourg.fr

RÉSUMÉ

De juillet 2003 à juin 2010, des levés au scanner laser terrestre (SLT) ont été effectués au lac du Miage (Val d'Aoste, Italie) dans le but d'y étudier l'évolution du glacier et de sa falaise de glace. Les nuages de points 3D ont été traités et assemblés en utilisant plus particulièrement le logiciel Polyworks. L'algorithme de consolidation nommé Best-Fit a été notamment analysé par une série de tests afin de connaître ses capacités intrinsèques et d'évaluer la pertinence et la précision de la construction des modèles 3D. En considérant les erreurs de consolidation et de référencement, les erreurs absolues finales d'assemblage des modèles sont de 35 cm entre juillet 2003 et juin 2006, puis de 20 cm entre octobre 2006 et juin 2010. Une telle évaluation constitue une borne inférieure aux interprétations qui seront conduites pour l'analyse de la mobilité du glacier et de sa falaise de glace.

MOTS-CLÉS : CONSOLIDATION, MÉTHODE ICP, BEST-FIT, MODÈLE 3D, NUAGE DE POINTS, SCANNER LASER TERRESTRE, LAC DU MIAGE.

ABSTRACT

From July 2003 up to June 2010, Terrestrial Laser Scanner acquisitions have been realised at the Miage Lake (Valley of Aosta, Italy). In order to study the evolution of the Miage Glacier and its ice cliff at the lake, 3D models have been built with the Polyworks software. The registration algorithm named Best-Fit has been studied through some tests to understand its intrinsic capacity and to assess the relevance and accuracy of 3D models. If we consider the registration and referencing error, we obtain final absolute deviation for 3D models of 35 cm between July 2003 and June 2006, then 20 cm between October 2006 and June 2010. This kind of assess is the first step to evaluate accuracy of interpretation driving for the analysis of the ice cliff mobility.

KEYWORDS: REGISTRATION, ICP METHOD, BEST-FIT, 3D MODEL, POINT OF CLOUD, TERRESTRIAL LASER SCANNER, MIAGE LAKE.

INTRODUCTION

La problématique de l'impact du réchauffement climatique sur la dynamique des milieux naturels en montagne est une question centrale. L'analyse du comportement des glaciers permet d'éclairer ce phénomène mais également de prévoir quels en seront les impacts économiques (ressource en eau, tourisme) et les effets induits sur les risques naturels (chute de séracs, ruptures de poches d'eau ou de barrages glaciaires). Pour cela de nombreux travaux ont été réalisés sur les glaciers afin de déterminer quantitativement leurs avancées ou reculs, leurs vitesses d'écoulement et leurs variations de surface et de volume, sur des périodes plus ou moins longues. Les techniques de levé topographiques les plus couramment utilisées pour ce type d'objet naturel sont la topométrie de précision (Blanc, 2003), la photogrammétrie terrestre et aérienne (Maas *et al.*, 2006 ; Kaufmann et Ladstädter, 2008 ; Fallourd *et al.*, 2010 ; Blanc, 2003 ; Socuro, 2008), l'interférométrie radar (Koehl *et al.*, 2009 ; Fallourd *et al.*, 2011), le GPS et l'analyse de photos aériennes (Lambiel, 2009), et enfin le LIDAR aéroporté et terrestre (Hopkinson et Demuth, 2006 ; Schwalbe *et al.*, 2008).

La falaise de glace du lac du Miage (Val Veny, vallée d'Aoste) est un objet particulièrement mobile (Tamburini *et al.*, 2005). Son étude nécessite une connaissance infra-métrique de sa géométrie, mais la dangerosité du site et son inaccessibilité requièrent une méthode d'acquisition à distance. La technique du balayage laser terrestre a donc été privilégiée.

Elle consiste à acquérir des données en utilisant la lumière laser pour mesurer directement, selon une trame angulaire régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre (Pfeifer, 2007). Contrairement à la photogrammétrie, les coordonnées 3D des points sur l'objet sont directement obtenues et le résultat n'est pas influencé par la variation des ombres portées sur le glacier par les nombreux blocs qu'il porte en surface (Schwalbe *et al.*, 2008). D'autres avantages comme la rapidité d'acquisition et la densité des nuages de points justifient l'emploi de cette technique. Une approche similaire a permis de détecter des mouvements de l'ordre du millimètre dans le cas d'éboulements rocheux par une méthode d'interpolation du plus proche voisin (Abellan *et al.*, 2009). Une telle précision est-elle envisageable sur la glace malgré la complexité et l'irrégularité des surfaces, l'humidité sur les parois de glace, la présence de masques dus à des blocs rocheux plurimétrique et la technique retenue basée sur la consolidation par *Best-Fit* ? Qu'en est-il sur cet objet particulier du Miage qui nécessite pour être couvert intégralement l'assemblage par *Best-Fit* de plusieurs scènes ? Cet article a pour objet de discuter les différentes étapes permettant de parvenir à un modèle en trois dimensions de la scène du lac du Miage et de quantifier l'influence de ces étapes sur l'extraction d'informations quantitatives telles que les déplacements et les changements de forme.

I - LA FALAISE DE GLACE DU LAC DU MIAGE : DU TERRAIN À LA MODÉLISATION

1 - Présentation du site d'étude

Le glacier du Miage, alimenté par la confluence de plusieurs glaciers qui prennent naissance à plus de 4000 m d'altitude, est localisé sur le versant sud-est du massif du Mont Blanc. Sa superficie de 10,6 km² (2005) fait de lui l'un des principaux glaciers italiens mais également l'un des principaux glaciers noirs des Alpes. En effet, en dessous de 2400 m d'altitude, le glacier est entièrement recouvert de débris hétérométriques (sables, graviers et blocs de toutes dimensions) s'étalant sur une langue de 6 km de long et de 0,5 à 1 km de large. Le glacier termine sa course dans le Val Veny par une langue trilobée, dont les fronts principaux se situent à environ 1750 m d'altitude. Un amphithéâtre morainique flanque la moraine latérale droite dans la courbure du glacier, au centre duquel se trouve notre objet d'étude (Figure 1), la falaise de glace d'où se détachent de petits icebergs au niveau du lac juxtaglaciaire du Miage (Deline *et al.*, 2004, Deline et Orombelli, 2005).

2 - Acquisition des données

Les données sur la falaise de glace du lac du Miage ont été acquises conjointement par une équipe d'Imageo et du laboratoire EDYTEM, dans le cadre de travaux de recherches entrepris sur le massif du Mont-Blanc, de juillet 2003 à juin 2010 à l'aide du scanner laser terrestre Optech Ilris 3D (*Intelligent Laser Ranging and Imaging System 3D*). Une à deux fois par an (Tableau 1), des levés au scanner laser ont été acquis sur une journée, durant les mois de juin ou juillet et septembre ou octobre. Les campagnes de mesures n'ont pas pu être temporellement régulières en raison (i) des difficultés d'accès au site liées à l'enneigement, (ii) des conditions météorologiques qui rendent impropre l'utilisation de la technique ou encore (iii) de la disponibilité du matériel et du personnel. Les données permettent tout de même d'envisager une analyse diachronique de la falaise de glace du Miage sur une période de 8 ans.

Avec une fenêtre de travail de 40° x 40°, le scanner Optech Ilris 3D peut acquérir 2000 points/seconde en

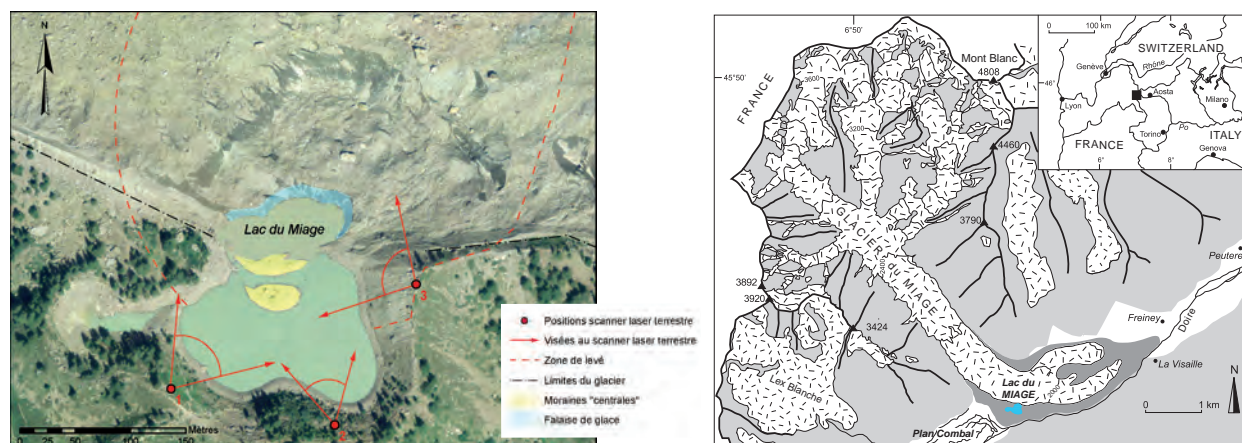


Figure 1 - Le site d'étude en 2006 et sa localisation sur le versant italien du massif du Mont Blanc. Les positions du scanner laser terrestre sont représentées avec leurs champs de vision. La zone de levé (tirets rouges) varie légèrement selon les années.

utilisant une longueur d'onde de 1 500 nm portant un signal qui est rétrodiffusé par la surface de glace. Le nombre de points acquis à chaque mission (Tableau 1) varie entre 5 et 20 millions en fonction des limites de la zone balayée et de l'importance dans la scène totale de la surface occupée par le lac.

La largeur de la scène à laquelle on s'intéresse est d'environ 200 m. Cela a nécessité à chaque fois la réalisation de 8 à 10 levés indépendants. Ces levés ont été réalisés depuis 3 positions dans la plupart des cas, chaque position regroupant plusieurs orientations du scanner afin de couvrir une fenêtre plus large que $40^\circ \times 40^\circ$. Enfin, dans chaque situation du scanner, plusieurs fenêtres ont été ciblées sur les parties clés de l'objet (de 1 à 4 fenêtres : Figure 2). La réduction de la taille des fenêtres a permis (i) un gain de temps considérable dans l'acquisition des données en évitant notamment l'acquisition de points sur le lac, ce facteur temps est particulièrement important (durée de la mission, autonomie des batteries) puisqu'il influe sur le choix des pas angulaires lors du levé ; (ii) l'uniformisation de la densité de points (nombre de points par unité de surface) sur l'ensemble de la scène ; en effet, en fixant le pas angulaire horizontal et vertical, l'éloignement de la position du scanner laser à l'objet diminue proportionnellement la résolution spatiale. Pour avoir une meilleure densité de points des nuages et augmenter le niveau de détail sur l'ensemble de la scène, la solution retenue a été de spécifier des pas angulaires propres à chaque fenêtre afin d'obtenir un pas moyen de la dizaine de centimètres sur l'ensemble de l'espace couvert par le projet.

En connaissant la distance moyenne pour chaque fenêtre (entre

100 et 500 m, prise avec une distance mètre longue portée) et la résolution spatiale finale espérée (10 cm), on peut retrouver les pas angulaires spécifiques. Ainsi, les pas angulaires horizontaux et verticaux choisis ont été de l'ordre de 20 mgon sur les moraines « centrales », 10 mgon sur la falaise de glace et 5 mgon sur les parties éloignées au-dessus du glacier. Au final, on obtient un espacement entre les points de 8 à 15 cm pour les parties à l'avant de la falaise de glace et de 20 cm pour les parties plus éloignées.

3 - Stratégie de construction des modèles 3D

Si l'acquisition de nuages de points par scanner laser terrestre est bien automatisée, ce n'est pas encore le cas du post-traitement. Effectivement, le traitement des données constitue une étape importante avant l'interprétation que ce soit en termes de précision ou de rendu graphique.

Epoques	Nombre de stations	Nombre de points dans le nuage	Erreur absolue globale de consolidation du modèle	Erreur maximale de consolidation du modèle	Référencement : Erreur absolue globale de consolidation par rapport à juin 2010
23/07/ 2003	11	5 652 088	<10 cm	15 cm	< 30 cm
04 /06/ 2004	6	4 496 381	<10 cm	15 cm	< 20 cm
08 /09/ 2004	18	10 758 984	<20 cm	30 cm	< 20 cm
06 /06/ 2005	7	17 938 828	<15 cm	30 cm	< 20 cm
20 /09/ 2005	8	20 350 328	Entre 20 et 40 cm	90 cm	-
21 /06/ 2006	7	6 975 991	<15 cm	30 cm	< 20 cm
05 /10/ 2006	9	5 017 443	<10 cm	20 cm	< 10 cm
18 /07/ 2007	8	7 055 699	<10 cm	30 cm	< 10 cm
24 /06/ 2008	12	11 786 222	<10 cm	20 cm	< 15 cm
10 /10/ 2008	10	8 435 193	<10 cm	20 cm	< 10 cm
17 /06/ 2009	10	5 358 321	<10 cm	30 cm	< 10 cm
25 /06/ 2010	10	8 116 974	<10 cm	20 cm	-

Tableau 1 - Chronologie des campagnes de mesures de la falaise de glace du lac du Miage, erreurs globales des modèles issues de la consolidation pour chaque époque et écart de consolidation des nuages de points de 2003 à 2009 par rapport au modèle de 2010. Les écarts sont estimés grâce à l'outil de comparaison Best-Fit sous IMAlign de Polyworks. Compte tenu des données inutilisables de septembre 2005.

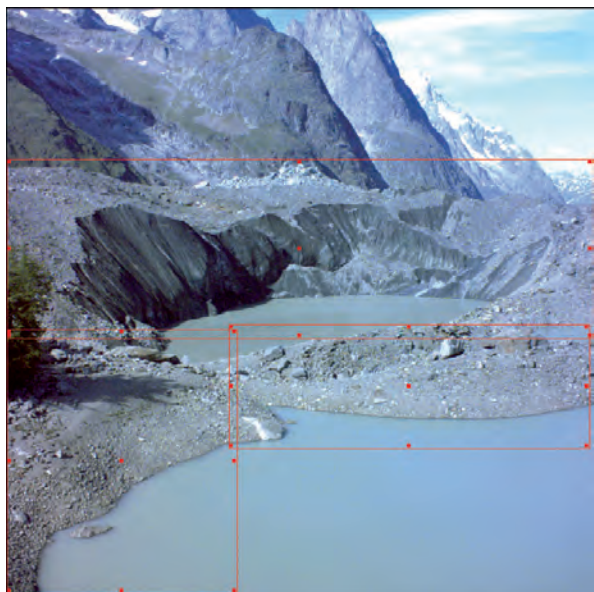


Figure 2 - Scène du lac du Miage, prise de la position 1 du scanner laser (Figure 1). Les rectangles rouges représentent les fenêtres scannées successivement.

Le logiciel *Polyworks* développé par la société *InnovMetric*, ici utilisé, a permis de réaliser le nettoyage des nuages de points (phase de prétraitement), leurs consolidations (phase d'assemblage) puis leurs comparaison (phase d'inspection).

Polyworks possède entre autre un outil appelé le *Best-Fit*, qui permet de consolider deux nuages de points en lui indiquant une position approximative des nuages via des paires de points saisis manuellement. Cette étape fait ici l'objet d'une analyse particulière. On veillera par la suite à qualifier le terme « points homologues » par paires de points dans le recouvrement. En effet, dans les nuages à consolider, il n'y a pas forcément deux points identiques communs aux deux nuages.

II - CONSOLIDATION DE NUAGES DE POINTS

Le principe de la consolidation (*registration* en anglais) consiste à chercher, de manière automatique, un certain nombre de points « homologues » entre deux nuages de points afin d'assembler ceux-ci. Lors de l'acquisition d'un objet, il est rare d'obtenir un modèle complet à partir d'une seule position de scanner. Plusieurs causes sont possibles: soit le champ de vision du scanner est limité, soit l'objet est de dimension trop importante, soit des obstacles gênent les visées et créent des masques dans la scène. C'est pourquoi, il est nécessaire de consolider les nuages issus des différentes positions de scanner laser (Grussenmeyer et Landes, 2011).

Le lac du Miage nécessite une acquisition des nuages de points 3D à partir de plusieurs stations. De fait, les nuages ont, à chaque position, un repère relatif indépendant. En effet, lors du levé, l'appareil n'a pas été positionné sur un point géoréférencé, et aucun cheminement polygonal n'a été effectué. La consolidation est basée sur les nuages de points eux mêmes, aucune cible n'ayant été placée dans la scène du fait de l'accessibilité difficile.

1 - Méthode Iterative Closest Point (ICP)

La méthode *Iterative Closest Point* (ICP) (Besl et McKay, 1992) est la méthode de base la plus couramment utilisée pour les algorithmes de consolidation et, de ce fait, par la majorité des logiciels sur le marché. Elle implique la résolution de deux problèmes : (i) la réalisation d'une consolidation avec des points non « homologues » et (ii) la correspondance de formes non élémentaires. Besl et McKay (1992) ont développé cette solution pour des données géométriques en trois dimensions (points, lignes, courbes de degrés différents, surfaces).

La méthode ICP repose sur le principe des moindres carrés, en minimisant, par itérations successives, les distances entre les deux nuages. L'algorithme cherche, pour chaque point dans le recouvrement, son « homologue » dans un rayon de recherche donnée, en prenant la distance minimale entre ce point et les autres points de l'ensemble. Ainsi, à chaque itération, l'algorithme calcule les paramètres de transformations (rotation et translation) afin de minimiser la fonction mathématique suivante donnée par Besl et McKay (1992) :

$$f(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - R p_i - T\|^2 \quad (\text{éq. 1})$$

N_p : nombre de points du nuage le moins dense dans la zone de recouvrement

x_i : points du nuage considérés comme « modèle » pour la consolidation

p_i : homologue de x_i dans le nuage « données » à consolider

R : matrice rotation 3x3, calculée à partir d'un quaternion unité à 4 paramètres q_0, q_1, q_2, q_3 .

Pour résoudre par la méthode des moindres carrés ce système surdéterminé de l'équation (éq. 1), la méthode ICP procède à la linéarisation du système. Puis elle effectue des itérations successives jusqu'à ce que les distances ne dépassent pas un certain seuil. L'un des points importants de l'algorithme est son théorème de convergence : l'algorithme ICP converge uniformément vers un minimum local en minimisant la fonction de distance (éq. 1) par les moindres carrés (Besl et McKay, 1992). Ainsi, il est nécessaire au départ, d'avoir une assez bonne approximation du positionnement des nuages pour permettre une convergence vers un minimum global.

L'algorithme ICP se décline donc en plusieurs étapes : la recherche des paires de points avec un certain rayon de recherche, la minimisation des distances par le principe des moindres carrés, l'application de la transformation rigide aux points du nuage « données » et enfin les itérations successives jusqu'à la convergence du calcul.

2 - Le Best-Fit d'IMAlign sous Polyworks

Le *Best-Fit*, proposé sous *Polyworks* dans le module *IMAlign*, est un algorithme qui repose sur le principe de la méthode ICP de points à surface (Guarnieri et al., 2006 ; Teza et al., 2007 ; Oppikofer et al., 2009). Afin de permettre une convergence rapide et vers un minimum global, il est impératif avec cet algorithme de rapprocher le plus possible les nuages entre eux grâce à l'outil « N paires de points ». Ainsi, l'utilisateur doit effectuer une transformation approximative du nuage en sélectionnant un minimum de trois paires de points dans le recouvrement (qui doit être de 20 % au minimum).

Ensuite, il faut choisir un rayon de recherche (distance maximale sous *IMAlign*). Ce rayon est un des paramètres d'entrée qui permet l'interactivité entre l'utilisateur et l'algorithme. Il permet de spécifier à quelle distance maximale l'algorithme doit chercher les paires de points considérées comme homologues.

Deux paramètres d'arrêt du *Best-Fit* sont possibles : le nombre d'itérations et la convergence. Spécifier le nombre d'itérations est valable en cas de dérive des nuages, c'est-à-dire lorsque la convergence n'arrive pas à être atteinte. Cependant, le critère d'arrêt principal est celui de la convergence qui indique si une solution, bonne ou mauvaise, a été trouvée.

D'après la notice d'utilisation du module *IMAlign* de *Polyworks* (Innovmetric, 2010), le critère de convergence est déterminé à partir de la matrice de transformation (ou calage). A chaque itération de l'algorithme, la convergence est calculée comme la somme de la différence au carré entre la matrice identité (Id) et la matrice transformation (M) calculée à la fin de l'itération considérée. Cette matrice transformation doit tendre vers la matrice identité puisqu'à la fin du processus les paires

de points ne doivent plus subir de translation ou rotation. Ainsi, les m_{ij} doivent tendre vers 0 sauf pour i égal à j où ils doivent tendre vers 1. La matrice transformation M a donc 6 degrés de liberté : 3 rotations et 3 translations (éq. 4). La quatrième ligne qui la compose est invariable et est une astuce pour permettre le calcul de la différence Id-M (éq. 2).

Ainsi, le critère de convergence c doit tendre vers 0 (éq. 3).

On peut évaluer le minimum à atteindre pour le critère de convergence afin de le définir comme point d'arrêt du processus *Best-Fit*. Il est calculé par :

$$c = \left(\frac{\sigma}{25}\right)^2 \text{ ou } c = \left(\frac{\sigma}{100}\right)^2 \quad (\text{éq. 5})$$

Selon la précision que l'on veut atteindre pour la consolidation (25 ou 100 fois meilleure que la précision initiale). σ représente la précision du scanner en unité du modèle.

$$\begin{aligned} \text{Id} - \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{éq. 2}) \end{aligned}$$

$$c = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (a_{ij})^2 \quad (\text{éq. 3})$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \\ m_{34} \end{bmatrix} \quad (\text{éq. 4})$$

Id : matrice identité 4x4

M : matrice de transformation 4x4

c : critère de convergence

R : matrice rotation

T : matrice translation

III - APPLICATION AU LAC DU MIAGE

1 - Tests de consolidations avec deux nuages de points

Afin d'apprécier cet outil *Best-Fit* et notamment sa précision dans le module *IMAlign* de *Polyworks*, deux tests ont été réalisés avec trois nuages de points acquis en septembre 2005. Le nuage central a ainsi été assemblé indépendamment avec les nuages recouvrant à gauche et à droite. Dans chacun de ces deux tests,

la consolidation s'est faite en faisant varier la distance maximale de 10 m à 1 cm afin de dépasser la valeur optimale du rayon de recherche. Ces deux tests ont été réalisés dans le but de comprendre l'algorithme du *Best-Fit* afin de pouvoir dégager une méthode pour optimiser le processus et quantifier la précision de la consolidation de deux nuages pour le lac du Miage. L'analyse des données du processus (nombre d'itérations, nombre de paires de points), les histogrammes

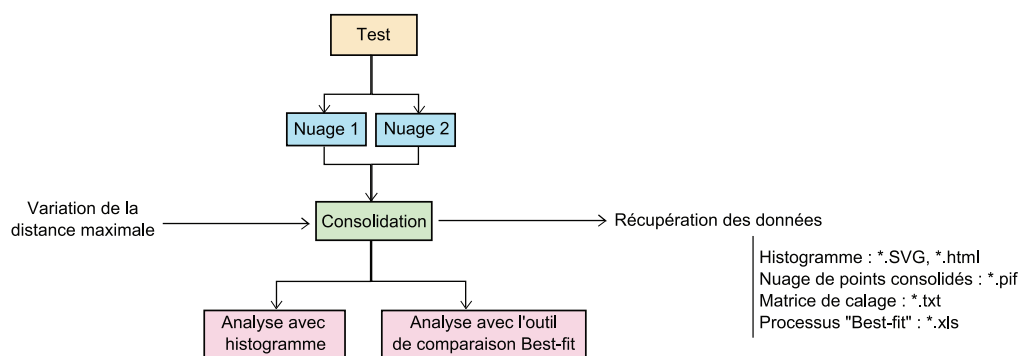


Figure 3 - Organigramme décrivant la démarche des tests.

(distribution de la distance entre points appariés caractérisée par sa moyenne et son écart-type) et l'outil de comparaison *Best-Fit* (inspection des nuages de points) ont permis d'obtenir une analyse cohérente des résultats pour les deux tests.

La Figure 3 décline les opérations réalisées pour les deux tests. Le principe est de consolider deux nuages de points et de faire varier la distance maximale (10 ; 5 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,2 ; 0,1 ; 0,05 ; 0,01 m). A chaque variation de la distance, plusieurs paramètres sont quantifiés. Tout d'abord, on note les différentes données du processus *Best-Fit* (convergence, nombres d'itérations, glissement...), la matrice de transformation et l'histogramme de distribution des distances entre points appariés. Le nuage de points consolidés est également sauvegardé pour inspection ultérieure.

La Figure 4 représente l'évolution du nombre d'itérations du processus d'ajustement par *Best-Fit* en fonction de la distance maximale. On a remarqué qu'au premier lancement du processus, 7 itérations sont nécessaires pour atteindre dans les deux tests la valeur de convergence. Les deux nuages étant encore assez éloignés l'un par rapport à l'autre (environ 50 cm), il est normal que la première étape soit plus longue que les autres. Pour les deux tests, on remarque un palier pour le nombre d'itérations entre 5 m et 50 cm de distance maximale. Ainsi, le processus converge très vite (1 ou 2 itérations) pendant ces étapes. Lorsque le rayon de recherche atteint 20 cm, le nombre d'itérations de l'algorithme pour le test 2 augmente à 6, se stabilise

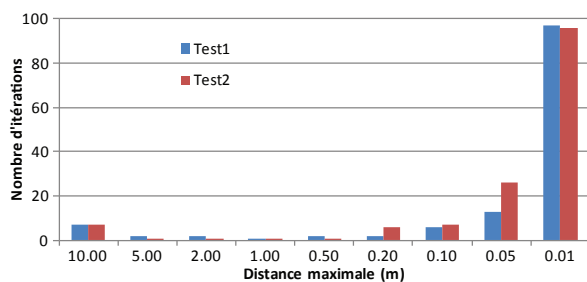


Figure 4 - Evolution du nombre d'itérations en fonction de la distance maximale pour les tests 1 et 2. Jusqu'à 50 cm de distance maximale, le nombre d'itérations est stable, puis augmente à partir de 20 cm.

pour 10 cm, pour terminer à 96 pour 1 cm. Comme le test 1 a un nombre d'itérations stable jusqu'à 20 cm de distance maximale, on peut en conclure que les paires de points s'éloignent les unes par rapport aux autres en dessous de 20 cm de rayon de recherche.

L'histogramme proposé dans le module IMAlign représente le nombre de paires de points en fonction de la distance entre ceux-ci. La courbe gaussienne, fournie par l'histogramme, permet d'en déduire un écart-type et une moyenne qui, dans notre cas, doit être proche de zéro, car la distance entre les paires de points doit tendre vers 0. Plusieurs informations peuvent être extraites des histogrammes des deux tests. Tout d'abord, les rayons de recherche entre 5 m et 50 cm ne sont pas nécessaires à appliquer puisque l'histogramme affiche, après application de 10 m de rayon de recherche, un intervalle d'écart entre paires de points de ± 30 cm. Ensuite, jusqu'à l'application de 20 cm en distance maximale, le comportement des courbes suit sensiblement celles des courbes de Gauss. Les erreurs de distances entre paires de points se répartissent correctement sur l'ensemble des paires de points du nuage dans le recouvrement. Cela prouve la bonne efficacité de la compensation qui repose, comme dit précédemment, sur le principe des moindres carrés. A contrario, lorsque l'on applique 10 cm de rayon de recherche, l'allure gaussienne des courbes est perdue pour atteindre progressivement un signal extrêmement bruité (Figure 5).

Un deuxième facteur montre de même qu'il est inutile d'appliquer le *Best-Fit* au-delà de 20 cm : c'est le nombre de paires de points dans le recouvrement. Pour que le processus du *Best-Fit* soit le plus efficace, il faut que l'échantillon de points considérés initialement soit stable tout le long du processus. En deçà de 20 cm, l'échantillonnage décroît (Tableau 2). Il y a risque de converger vers un minimum local et non global. Cela ne montre en aucun cas que le paramètre distance maximale soit dépendant de la densité et de la résolution spatiale des nuages initiaux. En effet, des tests en parallèle, sur le même schéma que les tests 1 et 2, ont permis de confirmer que pour des résolutions spatiales de 5, 10 et 50 cm, ce paramètre reste de 20 cm. De plus, les écarts-types restent inchangés (6 cm) par rapport à ceux que l'on atteint à l'issue des tests 1 et 2.

Enfin, l'évolution de l'écart type en fonction de la distance maximale confirme l'arrêt à 20 cm pour le paramètre du rayon de recherche (Figure 6). A partir de 20 cm, l'écart-type de la distance entre paires de points chute brusquement de 1 cm pour le test 1 et de presque

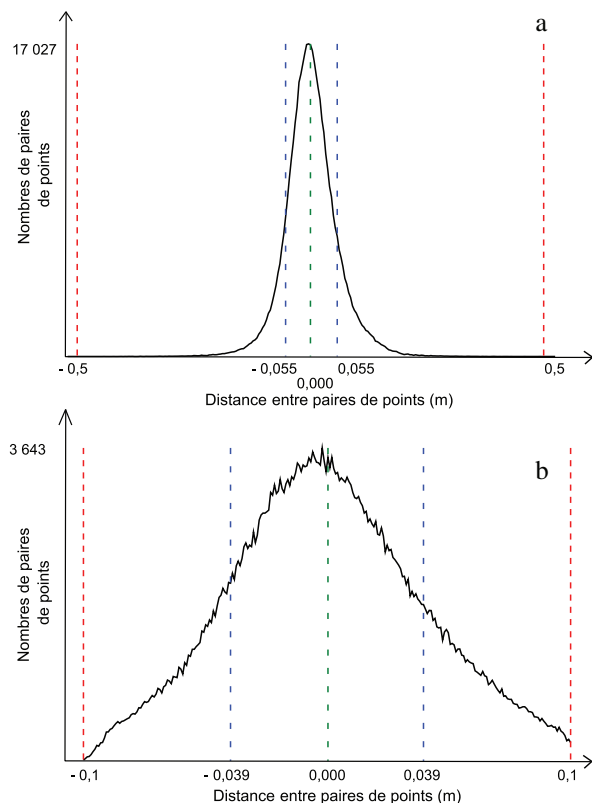


Figure 5 - Histogramme du nombre de paires de points dans le recouvrement en fonction de la distance entre les paires de points. a) histogramme pour le test 1 avec application du rayon de recherche de 50 cm. b) histogramme pour le test 1 avec application du rayon de recherche à 10 cm. Graphiquement, on remarque que la tendance de la courbe b est moins gaussienne que la courbe a.

Distance maximale (m)	Test 1		Test 2	
	Nombre de paires de points Total	Echantillon	Nombre de paires de points Total	Echantillon
10,00	---	---	748087	100%
5,00	467521	100%	747942	100%
2,00	467173	100%	747516	100%
1,00	467015	100%	747265	100%
0,50	466428	100%	746897	100%
0,20	462058	99%	737606	99%
0,10	427876	93%	658205	89%
0,05	320441	75%	472153	72%
0,01	29082	9%	6534	1%

Tableau 2 - Evolution du nombre de paires de points considéré par le Best-Fit suivant la distance maximale. En-dessous de 20 cm, des paires de points dans le recouvrement sont ignorées, impliquant une application du Best-Fit sur une base d'échantillonnage non représentatif. Les 1% de perte jusqu'à 20 cm représentent la tolérance sur les paires de points douteuses qui sont généralement à la limite du recouvrement.

2 cm pour le test 2 ! Les deux modèles se rejoignent finalement pour se confondre, révélant ici une dérive des nuages de chaque test en deçà de 20 cm.

Connaissant à présent la limite du rayon de recherche (20 cm) la précision effective de ce processus reste à analyser à partir de l'histogramme de sortie pour 20 cm. Pour le test 1, un intervalle de confiance entre -0,051 m et +0,051 m est affecté du niveau de confiance 1 σ (95%) et pour le test 2 un intervalle de confiance entre -0,058 m et +0,058 m est affecté du niveau de confiance 1 σ (95%). Dans les deux cas, la distance entre les paires de points est inférieure à 6 cm. Ces 6 cm caractérisent l'erreur de distance pour 95 % de nos paires de points qui, dans l'idéal (si on avait des points homologues), serait proche de zéro.

Afin d'apprécier visuellement les écarts entre les nuages de points sur la scène du lac du Miage, l'outil de comparaison « Points to Images » du Best-Fit proposée par IMAlign s'est avéré très efficace pour comprendre la répartition de nos erreurs statistiques obtenues précédemment (histogramme) et ainsi déduire les causes et faiblesses du Best-Fit. Pour le test 2, des écarts inférieurs à 7 cm sur la partie centrale du recouvrement et des écarts de 11 à plus de 15 cm sur les limites de zone de recouvrement sont à noter. Ainsi, le Best-Fit a tendance à plus se concentrer sur la partie centrale du recouvrement des deux nuages. La présence de débris rocheux sur la falaise de glace permet de réduire le bruit engendré par ce type de surface et d'obtenir des écarts entre nuages inférieurs à 10 cm à l'issue des consolidations.

On peut donc présumer attendre des écarts moyens de 10-15 cm pour le modèle global (ensemble des nuages qui constituent la scène du Miage). Ces deux tests ont également souligné les capacités et les conditions du Best-Fit pour une bonne consolidation. Ainsi, il est primordial d'avoir une bonne répartition des points dans le recouvrement pour rendre plus efficace la loi des statistiques. L'irrégularité des surfaces décrites par le glacier semble induire des écarts plus importants entre les nuages de points consolidés. Ces écarts ne s'expliquent pas par l'incapacité du Best-Fit à fournir une bonne solution mais plutôt par le levé. En effet, le bruit engendré par la mesure au scanner laser,

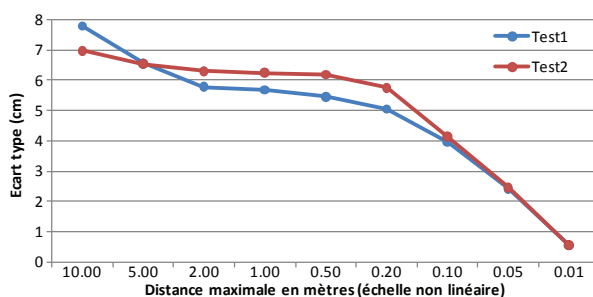


Figure 6 - Evolution de l'écart type en fonction de la distance maximale. Une échelle non linéaire a été préférée afin de mieux visualiser la diminution de l'écart-type après 20 cm.

à cause notamment de la capacité de réflectance du glacier et des visées rasantes, ont un impact direct sur les écarts obtenus.

Un protocole méthodologique sous le module *IMAlign* de *Polyworks*, a pu être mis en place à l'issue de ces tests pour assurer un meilleur contrôle et une meilleure appréciation des consolidations des nuages de points acquis sur le Miage. L'assemblage se fait désormais de manière plus efficace, avec un gain de temps considérable puisque l'on connaît plus rapidement le rayon de recherche à appliquer selon les nuages considérés. Enfin, le contrôle au fur et à mesure de l'assemblage permet à l'utilisateur d'avoir un suivi, local puis global, de la précision de consolidation du modèle effectué. Ce contrôle est effectué grâce aux données de l'histogramme et à l'appréciation visuelle de l'outil de comparaison du *Best-Fit*.

2 - Précision des modèles à l'issue de la consolidation

Les erreurs globales des modèles ont été obtenues à partir de l'outil de comparaison du *Best-Fit* proposé par *IMAlign* en faisant varier l'intervalle d'erreur entre les nuages de points («*High to Low Image*»). L'appréciation de l'erreur s'est faite visuellement sur les modèles afin de trouver le seuil le plus significatif (Figure 7).

Afin de construire le modèle de chaque année, la procédure retenue à l'issue des tests précédents a été appliquée et validée. Il en est ressorti des écarts moyens absolus entre les nuages globalement inférieurs à 10 cm sauf pour septembre 2004 et septembre 2005 (Tableau 1). En juin 2006, des écarts entre les nuages

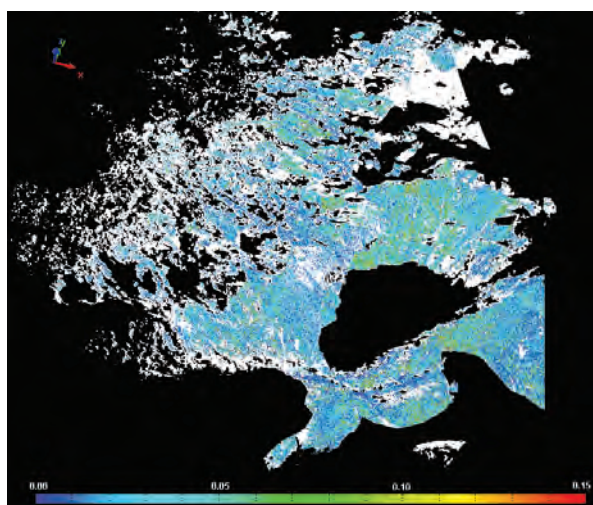


Figure 7 - Carte d'erreur sur la scène du lac du Miage de juin 2010 à l'issue du *Best-Fit* obtenue par l'outil de comparaison du *Best-Fit*. Globalement, les écarts absolus entre nuages sont inférieurs à 10 cm. Ils peuvent atteindre jusqu'à 15 cm dans les zones à fort recouvrements (6 nuages). En blanc, un seul nuage de points est présent.

de points ont été détectés lors de la consolidation sur la marge latérale et au-dessus du glacier. Pour cette période, deux levés ont été effectués à une semaine d'intervalle (21 et 29 juin), la première mission ayant été interrompue. En analysant la consolidation des deux groupes de nuages grâce à l'outil de comparaison *Best-Fit*, des écarts de 30 à 60 cm ont été obtenus. L'intervalle d'une semaine a été suffisamment long pour que l'objet soit modifié (écoulement du glacier), d'où des écarts considérables entre les deux dates. La partie fixe dans notre scène a été consolidée à 10 cm près pour les deux jours, écartant ainsi la possibilité d'une erreur de manipulation ou de défaillance de l'instrument. Seul le levé du 21 juin est conservé. Ainsi, globalement, les modèles montrent des écarts inférieurs à 15 cm, ce qui reste acceptable pour l'étude.

Afin de confirmer les écarts de consolidation obtenus dans le Tableau 1, une section a été réalisée sur le modèle consolidé de juin 2010 (Figure 8). En sélectionnant les points éloignés de 10 cm de part et d'autre du plan de la section A, le profil topographique de chacun des nuages en recouvrement a été réalisé ; il confirme des écarts inférieurs à 10 cm pour la moraine centrale et la falaise de glace du lac du Miage (Figures 9 et 10).

3 - Référencement des époques

Afin d'étudier l'évolution des mouvements du glacier de 2003 à 2010 par comparaison diachroniques des modèles (Deline *et al.*, 2011) et donc de comparer les époques, il importe de référencer les modèles consolidés précédemment pour les ramener dans un système relatif indépendant unique et permettre l'extraction de déplacements horizontaux et verticaux de points caractéristiques du glacier.

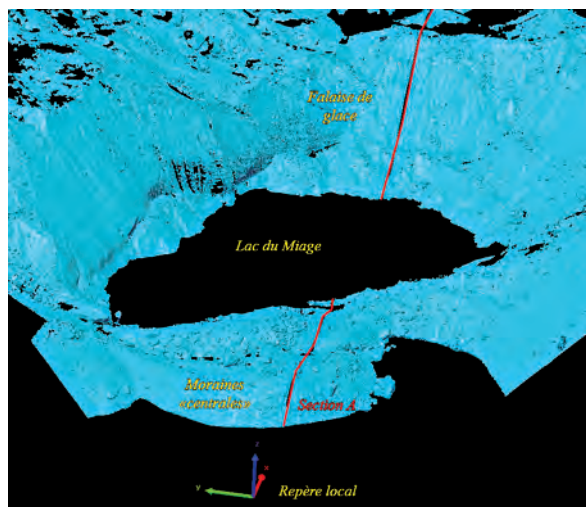


Figure 8 - Présentation du plan de section A sur le modèle de juin 2010. L'extraction des points du nuage s'est faite en procédant à une sélection des points à 10 cm de part et d'autre du plan. Les points exportés sont considérés comme semblables.

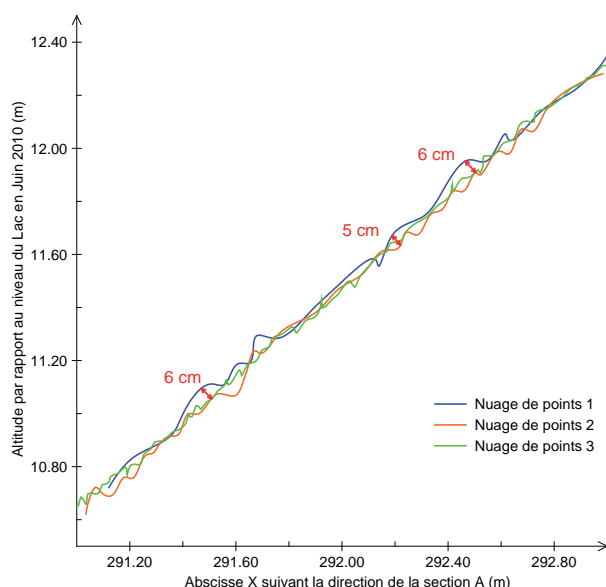


Figure 9 - Graphique représentant l'ensemble des nuages de points du modèle de juin 2010 après consolidation (voir Figure 8 pour le système de coordonnées retenu). Sur cette section, la falaise de glace présente des écarts entre nuages de points inférieurs à 6 cm. Ces écarts correspondent à ceux représentés par l'outil de comparaison du Best-Fit Figure 7.

Tous les modèles ont été référencés par rapport à la même période 25/06/2010 en appliquant à nouveau le principe du *Best-Fit*. Comme les points situés sur le glacier sont en mouvement d'une année sur l'autre, une partie fixe à chaque époque a été préalablement extraite. Cette zone correspond aux moraines « centrales » et à la moraine à l'est de la scène. L'application de ce traitement révèle des écarts de consolidation

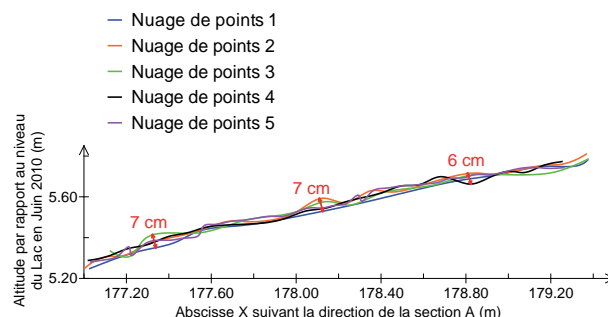


Figure 10 - Graphique représentant l'ensemble des nuages de points du modèle de juin 2010 après consolidation (voir Figure 8 pour le système de coordonnées retenu). Sur cette section, les moraines centrales présentent des écarts entre nuages de points inférieurs à 7 cm. Ces écarts correspondent à ceux représentés par l'outil de comparaison du Best-Fit Figure 7.

entre modèles (Tableau 1). Juillet 2003 et juin 2004 présentent ainsi des écarts respectivement inférieurs à 30 et 20 cm. Ceci peut s'expliquer par le fait que leur recouvrement avec le modèle de 2010 ne concerne que la moraine à l'est de la scène. Le *Best-Fit* a donc été appliqué sur une zone mal répartie dans la largeur de la scène, et qui n'est de surcroît pas absolument fixe : en effet, à mesure des consolidations, cette moraine a toujours affiché des écarts plus élevés que le reste de la zone fixe, car d'avantage affectée par l'érosion (ruissellement, déchaussement de blocs). À partir d'octobre 2006, les consolidations sont meilleures (écart généralement inférieur à 10 cm).

Un plan horizontal de référence a été modélisé à partir du lac du Miage en 2010. Il constitue, après changement de repère, le plan XY du repère relatif des modèles à inspecter.

CONCLUSION

L'étude présentée dans cet article avait pour objectif de comprendre le fonctionnement de l'algorithme du *Best-Fit* sous *Polyworks*, d'analyser la pertinence de cette méthode sur des données complexes et inaccessibles, et de développer une procédure efficace sous *IMAlign* afin d'optimiser la qualité de consolidation des nuages de points acquis durant huit ans sur le site du lac du Miage. La précision des modèles du site entre 2003 et 2010 a été déterminée et a permis de proposer la borne inférieure pour l'évaluation des déplacements détectables avec le scanner laser terrestre Ilris 3D. Ainsi, pour les modèles de juillet 2003 à juin 2006, l'erreur de mesure des points est de 35 cm. Elle est de 20 cm pour les modèles d'octobre 2006 à juin 2010. Ces erreurs sont l'addition des écarts moyens des modèles issus des consolidations propres à

chaque année et du référencement par rapport à 2010. Les erreurs de levé, liées aux erreurs instrumentales ou à la capacité de réflectance des objets naturels (glace) sont de fait incluses dans les écarts de consolidation des modèles pour chaque période. En effet, les erreurs de consolidations dépendent de l'erreur de mesure ainsi que de l'espacement entre points des nuages levés (Oppikofer et al., 2009).

Ce travail préalable, basé sur des tests effectués directement sur le logiciel, a permis de montrer les limites des précisions que l'on peut raisonnablement atteindre pour l'exploitation diachronique de la géométrie du glacier du Miage dans le secteur du lac. Il confirme l'importance du travail de post-traitement pour la précision des données.

Remerciements

Un remerciement particulier est adressé à tous ceux qui ont participé aux acquisitions des données sur le terrain depuis 2003: Massimo Broccolato, Dario Conforti, Stephan Gruber, Marion Guisset, Paolo Federici, Romain Mazué, Gianni Mortara, Antoine Rabatel, André Roveyaz, Ludovic Ravel, Emmanuel Malet.

BIBLIOGRAPHIE

- ABELLAN A., JABOYEDOFF M., OPPIKOFER T., VILAPLANA J.-M., 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Naturel Hazards Earth System Sciences*, 9, 365-372.
- BESL P.J., MCKAY N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 2, 239-256.
- BLANC R., 2003. Etude de la barre de seracs du glacier de Taconnaz : confrontation des outils topométriques et photogrammétrique. Mémoire de travail de fin d'étude, Ecole Supérieur des Géomètres et Topographes, 210 p.
- DELINE P., DIOLAIUTI G., KIRKBRIDE M.P., MORTARA G., PAVAN M., SMIRAGLIA C., TAMBURINI A., 2004. Drainage of ice-contact Miage Lake (Mont Blanc Massif, Italy) in September 2004. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 27 (2), 113-119.
- DELINE P., OROMBELLI G., 2005. Glacier fluctuations in the western Alps during the Neoglacial as indicated by the Miage morainic amphitheatre (Mont Blanc massif, Italy). *Boreas* 34, 1-12.
- DELINE P., GRANGE C., JAILLET S., TAMBURINI A., 2011. Sept ans de suivi de la dynamique de la falaise de glace du lac du Miage (massif du Mont Blanc) par scanner laser terrestre. *Collection EDYTEM*, 12, 95-106.
- FALLOURD R., VERNIER F., FRIEDT J.-M., MARTINC G., TROUVÉ E., MOREAU L., NICOLAS J.-M., 2010. Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras. Application to the Argentière. In PAPARODITIS N., PIERROT-DESEILLIGNY M., MALLET C., TOURNAIRE O. (Eds), *IAPRS*, 38, Part 3B – Saint-Mandé, France, September 1-3.
- FALLOURD R., HARANT O., TROUVÉ E., NICOLAS J.-M., GAY M., WALPERSDORF A., MUGNIER J.-L., SERAFINI J., ROSU D., BOMBRUN L., VASILE G., COTTE N., VERNIER F., TUPIN F., MOREAU L., BOLON P., 2011. Monitoring Temperate Glacier Displacement by Multi-Temporal TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, ISSN : 1939-1404.
- GUARNIERI A., PIROTTI F., PONTIN M., VETTORE A., 2006. 3-D surveying for structural analysis applications. Edited by: KAHMEN H. AND CHRZANOWSKI A., 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, Austria, 22-24 May.
- HOPKINSON C., DEMUTH M.N., 2006. Using airborne lidar to assess the influence of glacier downwasting on water resources in the Canadian Rocky Mountains. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 2, 212-222.
- INNOVMETRIC, 2010. Polyworks/IMAlign. Reference guide, version 11.0, 286 p.
- KAUFMANN V., LADSTÄDTER R., 2008. Application of terrestrial photogrammetry for glacier monitoring in alpine environments. Beijing, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, B8.
- KOEHL M., BOMBRUN L., GAY M., TROUVÉ E., BOLON P., NICOLAS J.-M., VASILE G., PÉTILLOT Y., LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2009. Interférométrie radar satellitaire et mesures GPS à la surface du glacier d'Argentière : comparaisons et validations. *Revue du GRETSI, Traitement du Signal*, 26, 2, 109-126.
- LAMBIEL C., 2009. Le glacier rocheux déstabilisé de Tsaté-Moiry (VS) : caractéristiques morphologiques et vitesses de déplacement. In LAMBIEL C., REYNARD E., SCAPOZZA C. (Eds) (2011). La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n° 36). Institut de géographie, Université de Lausanne.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., 2011. Lasergrammétrie terrestre. *Collection EDYTEM*, 12, 11-28.
- MAAS H.-G., DIETRICH R., SCHWALBE E., BÄSSLER M., WESTFELD P., 2006. Analysis of the motion behaviour of Jakobshavn Isbræ glacier in Greenland by monocular image sequence analysis. *International Archives of Photogrammetry*, 36, 5, 179-183.
- OPPIKOFER T., JABOYEDOFF M., BLIKRA L.H., DERRON M.H., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using Terrestrial Laser Scanning. In LOCAT J., PERRET D., TURMEL D., DEMERS D., LEROUÉIL S. (Dir.). Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management, Presse de l'Université Laval, Québec, 211-218.
- PFEIFER N., 2007. Overview of TLS systems, overall processing and applications, theory and application of Laser Scanning. IPRS summer school 2007, Ljubljana, Solvenia.
- SCHWALBE E., MAAS H.-G., DIETRICH R., EWERT H., 2008. Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range laser scanner point clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, B5, 457-462.
- SOCURO A., 2008. Etude du retrait des glaciers depuis cinquante ans dans les bassins hydrologiques alimentant en eau la ville de la Paz-Bolivie (16°S). Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble 1, 235 p.
- TAMBURINI A., DELINE P., MORTARA G., 2005. Time-space modeling with terrestrial Lidar. Monitoring ice cliff evolution of the Miage Glacier, Italy, with ILRIS-3D. *GIM International*, 19, 11, 31-33.
- TEZA G., GALGARO A., ZALTRON N., GENEVOIS R., 2007. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *Int. J. Remote Sens.*, 28, 3425-3446.

SEPT ANS DE SUIVI DE LA DYNAMIQUE DE LA FALAISE DE GLACE DU LAC DU MIAGE MASSIF DU MONT BLANC PAR SCANNER LASER TERRESTRE

*SEVEN YEARS OF MONITORING OF THE DYNAMICS OF THE MIAGE LAKE ICE CLIFF
(MONT BLANC MASSIF) BY TERRESTRIAL LASER SCANNING*

PHILIP DELINE¹, CHARLES GRANGE^{1,2}, STÉPHANE JAILLET¹, ANDREA TAMBURINI³

¹ Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73360 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

² Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 24 bd de la Victoire, 67084 Strasbourg cedex, France.

³ Imageo S.r.l., Via Valperga Caluso, 35, 1012 Torino, Italie.

Contact : philip.deline@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

De juillet 2003 à juin 2010, douze levés par scanner laser terrestre ont été réalisés au lac du Miage (massif du Mont Blanc, Italie) pour étudier la dynamique du système glacier/lac reflétée par l'évolution de la falaise de glace. Du fait de la perturbation du système introduite par la vidange rapide du lac de septembre 2004, trois périodes de fonctionnement peuvent être distinguées : (i) jusqu'en 2004 : fonctionnement 'normal' selon un cycle annuel alternant exondation hivernale du plancher de glace prolongeant la falaise et ablation estivale de celui-ci avec recul marqué de la falaise, surtout à l'est ; (ii) 2005-2008 : découplage entre l'ancienne falaise et le lac, autour duquel une nouvelle se reforme progressivement, plus réduite ; (iii) depuis 2008 : retour au fonctionnement « normal », avec une extension du lac qui reste réduite.

MOTS-CLÉS : LAC DU MIAGE, MASSIF DU MONT BLANC, DYNAMIQUE GLACIAIRE, SCANNER LASER TERRESTRE, NUAGE DE POINTS, MODÈLE 3D.

ABSTRACT

From July 2003 up to June 2010, twelve terrestrial laser scanner surveys were carried out at the ice-marginal Miage Lake (Mont Blanc massif, Italy) to study the dynamics of the glacier/lake system, which is illustrated by the ice cliff evolution. Because of the disruption of the system due to the rapid drainage of the lake in September 2004, three periods can be distinguished: (i) until 2004: 'normal' dynamics with an annual cycle of winter uplift of the ice foot that extends the cliff, and summer ablation of the ice foot with retreat of the cliff, especially in the eastern area; (ii) 2005-2008: decoupling between ancient cliff and the lake, around which a new reduced cliff forms gradually; (iii) since 2008: back to a « normal » dynamics; extension of the lake still remains small.

KEYWORDS: LAKE MIAGE, MONT BLANC MASSIF, GLACIER DYNAMICS, TERRESTRIAL LASER SCANNER, POINT CLOUD, 3D MODEL.

INTRODUCTION

Plusieurs lacs de grand volume en contact avec des glaciers se sont récemment formés ou développés dans les Alpes occidentales. Ainsi, le lac supraglaciaire Effimero s'est développé sur le ghiacciaio del Belvedere (massif du Mont Rose, Italie) à partir de 2001, jusqu'à atteindre un volume maximal de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ en juillet 2002 ; une très lourde opération de contrôle fut mise en œuvre pour parer le risque induit par une vidange catastrophique (Mortara et Mercalli, 2002 ; Mortara et Tamburini, 2009). Le lac juxtaglaciaire qui s'est développé sur le glacier de Rochemelon (massif de la Vanoise, France) à partir des années 1950, et plus particulièrement depuis 1985 (Mercalli *et al.*, 2002), a atteint un volume de $0,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ en septembre 2004. Devant le risque d'occurrence d'une vidange brutale, son niveau a alors été abaissé artificiellement en octobre, avant qu'il ne soit partiellement vidangé pendant l'été 2005 par l'ouverture à l'explosif d'une tranchée pérenne (Vincent *et al.*, 2010a). Enfin, concluant cette décennie remarquable, la découverte par des mesures géophysiques d'une poche d'eau intraglaciaire dans le glacier de Tête Rousse (massif du Mont Blanc) a entraîné une opération de pompage très médiatisée pendant l'été 2010 (Peillex et Tournaire, 2010), la catastrophe de Saint-Gervais de 1892 (175 victimes), due à la vidange brutale d'une poche de ce même glacier (Vincent *et al.*, 2010b), a en effet marqué la mémoire locale.

Dans le contexte du réchauffement climatique actuel, de nombreux lacs se forment au contact de glaciers en position supra-, juxta- ou proglaciaire sous l'effet du retrait glaciaire généralisé depuis la fin du Petit Âge Glaciaire et qui a accéléré depuis la dernière réavan-

cée des années 1980. Mais les interactions glacier/lac et glace/eau restent mal comprises, d'autant que les situations de crise comme celles rappelées ci-dessus ne laissent guère la possibilité d'identifier posément les différents facteurs et dynamiques mis en jeu – même si ces interactions prennent le plus souvent une forme non catastrophique.

Le lac juxtaglaciaire du Miage, qui existe depuis plus de deux siècles et a fait l'objet d'observations anciennes et précises, constitue un site intéressant pour l'étude de ces interactions glacier/lac. S'il a été le lieu d'un accident spectaculaire en 1996 (Tinti *et al.*, 1999), ce n'est toutefois pas la question du risque qui a justifié l'étude dont nous présentons ici les premiers résultats, mais la dynamique originale du système glacier/lac. En effet, la position de la falaise de glace varie à la fois dans l'année et d'une année sur l'autre, en fonction de la vitesse d'écoulement du glacier, de la dynamique du lac – qui combine vidange puis remplissage lents et saisonniers et vidanges rapides irrégulières – et de celle de la couverture détritique supraglaciaire. L'accessibilité du site a facilité les observations conduites lors de visites régulières, répétées au moins une demi-douzaine de fois par an avec photographies systématiques depuis plusieurs stations, et de missions de levés par scanner laser terrestre, réalisées une à deux fois par an. Cet article présente une première analyse diachronique de la dynamique de la falaise de glace depuis 2003, sur la base des modèles 3D obtenus, qui permettent de vérifier des observations antérieures et dont la haute résolution autorise une quantification ; elle s'intéresse en particulier aux effets de la vidange rapide de septembre 2004 sur cette dynamique.

I - LE LAC DU MIAGE ET SA FALAISE DE GLACE

1 - Présentation du site d'étude

Le glacier du Miage est l'un des principaux glaciers du massif du Mont Blanc (Figure 1). Il résulte de la confluence de quatre glaciers dont le plus élevé prolonge la micro-calotte glaciaire du Mont Blanc (4810 m). Après s'être écoulé dans une vallée glaciaire longue de 6 km et remarquablement calibrée, il forme un coude et barre le Val Veny – le lac de barrage morainique étant désormais remblayé (Plan Combal). Il se termine par trois lobes, dont les deux principaux atteignent c. 1750 m. Son épaisseur immédiatement à l'amont du coude atteignait 250 m en 1997. Sa couverture détritique supraglaciaire continue sur 4 km², sa taille (10,6 km² en 2005) et son encaissement confèrent au Miage un caractère « himalayen » (Figure 2).

Outre quelques petits lacs supraglaciaires, le glacier compte deux lacs juxtaglaciaires. Le lac du Jardin du

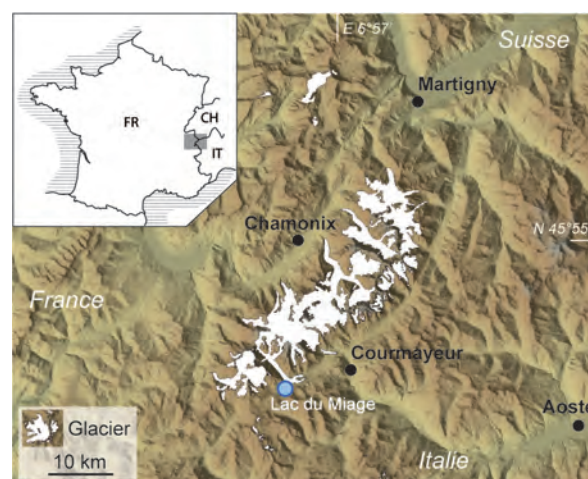


Figure 1 - Localisation du massif du Mont Blanc et du glacier du Miage. Le rond bleu indique la position du lac du Miage.



Figure 2 - Le glacier du Miage, au pied du Mont Blanc (photo M. Le Roy, 2008). Au premier plan, le lac juxtaglaciaire du Miage, au centre de l'amphithéâtre morainique du Miage ; à l'amont : le Plan Combal, lac de barrage morainique aujourd'hui remblayé. Une couverture détritique supraglaciaire de 10 à 40 cm d'épaisseur en moyenne occupe presque entièrement la zone d'ablation du glacier.

Miage (ou lac Vert), de faible extension, est situé sur la marge interne du lobe sud ; le lac du Miage, au cœur de l'amphithéâtre morainique qui flanque la moraine latérale droite, est situé 1 600 m plus à l'amont, sur l'extérieur du coude. Principal site touristique du Val Veny depuis plusieurs décennies, le lac du Miage constitue un objet d'étude scientifique ancien (Baretti, 1880 ; Sacco, 1917, 1921 ; Capello, 1940 ; Cerutti, 1951 ; Lesca, 1956). Depuis une décennie, le lac (Chiarle, 2000 ; Deline *et al.*, 2004 ; Diolaiuti *et al.*, 2005, 2006 ; Masetti *et al.*, 2009) et l'amphithéâtre morainique (Deline, 1999 ; Orombelli et Deline, 2002 ; Deline et Orombelli, 2005) ont fait l'objet d'un intérêt renouvelé.

Le lac du Miage est entouré de cordons morainiques, sauf au nord où il est limité par une falaise de glace (Figure 3). Celle-ci atteint 20-30 m de hauteur lorsque le niveau de l'eau atteint sa côte maximale (2016 m), contrôlée par un petit exutoire dans le seuil morainique à l'extrémité ouest du bassin ouest. Le lac avait une superficie de 36 000 m² en 2003 (Diolaiuti *et al.*, 2005), dépassant 300 m dans sa plus grande longueur. Des cordons morainiques séparent le lac en cinq bassins (N, NE, SE, SW et W) dont la profondeur varie de moins de 6 m dans le bassin W à 32 m dans le bassin SE – le bassin N, qui correspond au plancher de glace normalement immergé qui prolonge la falaise, ayant une profondeur de quelques mètres au plus.

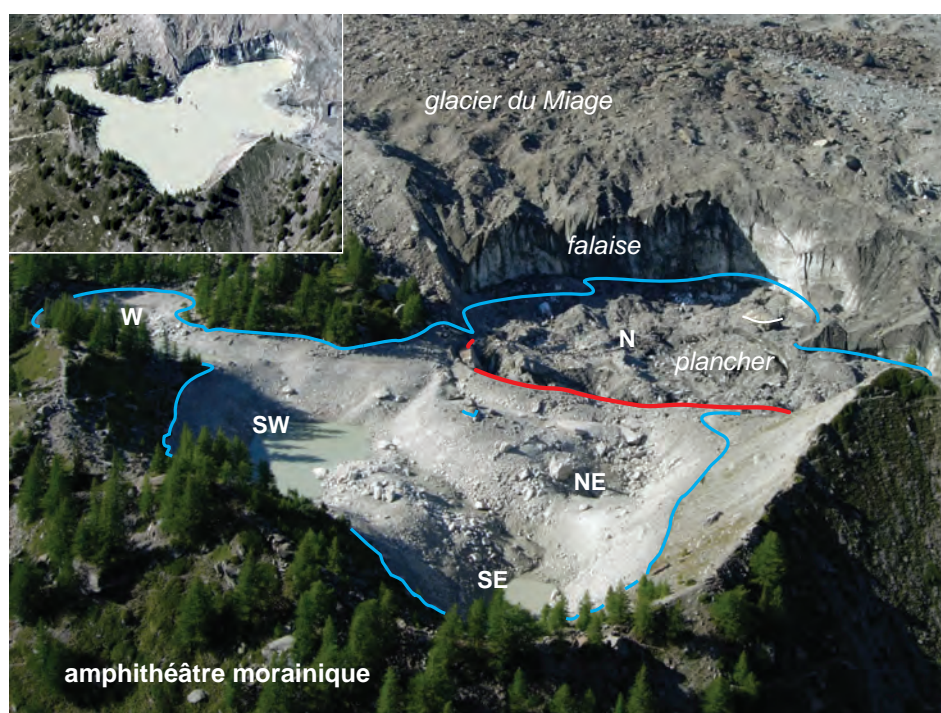


Figure 3 - Partie supérieure de l'amphithéâtre morainique du Miage lors de la dernière vidange rapide du lac (photo A. Tamburini, 16/09/2004). Le trait bleu indique le niveau maximal du lac du Miage ; le trait rouge indique le contact entre le glacier (plancher, ordinairement immergé) et les moraines de l'amphithéâtre. Quatre bassins (NE, SE, SW et W) composent le lac sont repérés ; leur profondeur varie entre 6 (W) et 25 m (SE) ; un 5^e bassin (N) correspond au plancher de glace. En haut à gauche : aérophotographie oblique du 01/09/2004 (FM) ; le lac mesure c. 300 m dans son grand axe.

2 - Fonctionnement et dynamique du lac du Miage

Contrairement à nombre de lacs supra- ou juxtaglaciaires, le lac du Miage est pérenne. Il existe depuis au moins la fin du 18^e siècle, comme le montre une carte levée en 1797-1799 (Figure 4) ou comme le suggère un dessin de Bourrit publié par Saussure (1786). Néanmoins, il a connu des variations notables de sa forme et de sa superficie depuis le milieu du 19^e siècle – période à partir de laquelle des cartes en sont réalisées. Celle de Forbes (1843) montre qu'en 1842 le lac se cantonne probablement à l'actuel bassin ouest. En 1878, le bassin oriental est occupé par un lac d'une superficie inférieure à celle du lac ouest actuel, tandis qu'un très petit lac est en contact avec la falaise – la superficie totale des lacs étant de *c.* 20 000 m² (Lesca, 1956) ; cette configuration assez proche de l'actuelle ne s'observe plus en 1916 : seuls les deux lacs occidental et oriental sont présents (Figure 5). La superficie totale du lac était de 35 150 m² en 1952 (Figure 5) et de 37 900 m² en 1953 selon Lesca (1956).



Figure 4 - Carte physique et minéralogique du Mont Blanc et des montagnes et vallées qui l'avoisinent [...] (détails), de J.B.S. Raymond (*c.* 1815 ; *c.* 1 : 130 000 ; 58 × 86,5 cm ; Musée Savoisien GF04, Chambéry). Le lac du Miage est représenté immédiatement au-dessus des lettres DE, avec une longueur de *c.* 200 m.

Le lac a un fonctionnement saisonnier : son niveau s'abaisse progressivement au début de l'automne, lorsque son alimentation par le glacier diminue puis devient presque nulle ; il remonte à la fin du printemps, avec la fusion nivale puis l'alimentation glaciaire, complétées par les précipitations orageuses estivales. Les versants de l'amphithéâtre qui sont au vent – de direction principale SW, et donc généralement bien exposés – sont privés de couverture nivale durable durant tout

l'hiver ; le contraste est remarquable avec ceux sous le vent, exposés nord, qui conservent au contraire un épais manteau nivale à grandes congères. De la fusion nivale printanière dans l'amphithéâtre et sur le glacier résulte la première lame d'eau qui alimente les bassins (à partir d'avril ou mai selon les années), ennoyant parfois la glace qui s'était formée à la surface des lacs à la fin de l'automne à la suite de leur individualisation progressive.

L'eau qui provient du glacier – la fusion est d'abord principalement nivale, puis devient essentiellement glaciaire – alimente le bassin nord, directement au contact de la falaise de glace. L'eau percole à travers les moraines internes et alimente le bassin sud-est, qui est le plus profond. La montée du niveau d'eau entraîne l'envolement du bassin nord-est, peu profond, puis celui du bassin sud-ouest lorsque le seuil morainique situé 10 m en-dessous du niveau maximal du lac est atteint. Enfin, le lac unique qui occupe les bassins orientaux s'étend au bassin ouest lorsque le seuil haut perché de celui-ci (*c.* 3 m sous le niveau maxi du lac) est à son tour franchi. Le niveau d'eau alors identique dans les bassins nord-est, sud-est et sud-ouest s'est par exemple élevé de 4 m entre le 02/06 et le 17/07/2005 (Masetti *et al.*, 2009). Pendant l'été, de nombreux petits icebergs sont vèlés par la falaise et se déplacent sur le lac en fonction de la direction du vent et de leur taille (échouage sur les seuils morainiques), constituant une source majeure d'alimentation du lac (Diolaiuti *et al.*, 2006).

À l'automne, le niveau du lac s'abaisse, jusqu'à se scinder généralement en plusieurs petits lacs qui occupent les bassins les plus profonds ou les moins perméables (Figure 6). En effet, le fond des bassins est tapissé d'une couche compacte de lamines de sédiments fins d'épaisseur et granulométrie variables. Celle du bassin ouest comporte 40 % d'argiles (< 2 µm) et 50 % de silts (< 62,5 µm), quand la couche au fond des bassins sud-est et sud-ouest en compte respectivement 25 % et 45 % (Masetti *et al.*, 2009) ; des *dropstones* (*i.e.* des blocs transportés par les icebergs puis déposés lors de leur fusion) centimétriques à pluridécimétriques sont emballées dans ces sédiments fins. L'épaisseur de cette couche de sédiments fins laminée est plurimétrique dans le bassin ouest (un carottage de 3 m n'a pas atteint sa base), alors que le seuil qui sépare les bassins sud-ouest et sud-est est recouvert par 80 cm ; le fond du bassin sud-est est lui constitué de blocs grossiers drapés d'une mince couche de fines. Ces caractéristiques sédimentologiques différentes expliquent que la percolation automnale puisse être très efficace au fond du bassin sud-est (abaissement de plus d'une dizaine de mètres en trois semaines en septembre - octobre 2004) et très réduite dans le bassin ouest (- 25 cm seulement pendant la même période).

Au-delà de ce fonctionnement saisonnier, le lac est affecté par des vidanges rapides. Entre 1930 et 1990, 16 vidanges de ce type ont été recensées (Chiarle, 2000), la plus récente ayant eu lieu début septembre 2004 (Deline *et al.*, 2004). Cinq jours après le début de cette vidange,

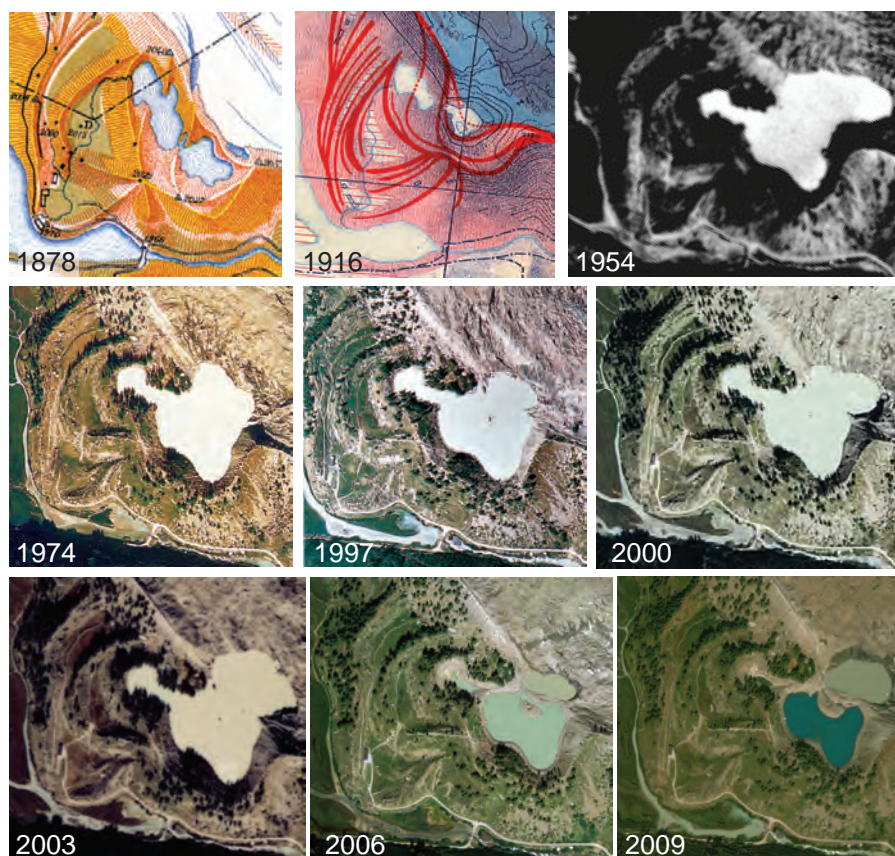


Figure 5 - Evolution du lac du Miage et de la position de sa falaise de glace de 1880 à 2009.

- 1878 : Carta del Ghiacciaio del Miage. Parte inferiore (détail), par C.C. Marengo d'après les levés de M. Baretti. (1 : 10 000 ; 27,5 × 41 cm) (Baretti, 1880) ;
- 1916 : Apparato morenico del Ghiacciaio del Miage (détail), par F. Sacco. [250 × 455] (Sacco, 1917) ;
- 1954 : aérophotographie verticale IGM du 30/08/1954 (détail) ;
- 1974 : aérophotographie verticale RAVA du 13/09/1974 (détail) ;
- 1997 : aérophotographie verticale RAVA (détail) ;
- 2000 : aérophotographie verticale RAVA (détail) ;
- 2003 : aérophotographie verticale RAVA (détail) ;
- 2006 : orthophotographie RAVA (détail) ;
- 2009 : image satellite GeoEye-Google Earth du 29/08/2009 (détail).



Figure 6 - Vidange lente du lac du Miage entre le 17/10/2007, à gauche (Photo G. Mortara) et le 12/11/2007, à droite (Photo P. Deline).

les volumes drainés dans les bassins oriental et occidental (obtenus en comparant deux MNT du lac) étaient, respectivement, de 311 000 m³ et 12 000 m³. Le total de 323 000 m³ ayant été drainé pour l'essentiel sur c. 48 à 72 h, le débit moyen de la vidange n'a été que de c. 1,25 à 2 m³/s (Deline *et al.*, 2004). Le débit moyen de la Doire de Veny pendant cette période, supérieur à 15 m³/s, et ses variations journalières (rapport 1,5 à 2 entre minimum et maximum journaliers) expliquent que l'apport en volume de la vidange n'a pas été remarqué par la population à l'aval.

3 - Dynamique de la falaise de glace

Cette dynamique est étroitement liée à celle du lac. Inscrite dans le flanc droit du glacier du Miage, la falaise de glace subverticale est orientée vers le sud. La partie émergée mesure généralement une trentaine de m dans son secteur ouest, s'abaissant vers l'est. Son sommet est constitué par la couverture détritique supraglaciaire de 10 à 40 cm d'épaisseur en moyenne, à blocs métriques à plurimétriques. Ces débris sont régulièrement déchargés dans le lac. La vidange de 2004 a

permis l'observation de la morphologie de son soubassement. Le bassin N était occupé par un plancher de glace (Figure 3) d'une épaisseur de *c.* 90 m au droit de la falaise (Deline *et al.*, 2004) ; il résulte du détachement régulier d'icebergs lorsqu'il est immergé sous *c.* 5 m d'eau. Sa surface était recouverte par une couverture détritique semblable à celle du glacier, sauf dans une dépression (profonde de *c.* 10 m dans son secteur central) nappée de silts noirs et jonchée de cônes de débris à cœur de glace et de petits icebergs échoués. Le contact entre le plancher de glace et la moraine la plus interne se fait par un espace qui s'enfoncé à plus de 23 m sous le niveau maximal du lac.

Quand le niveau du lac atteint la falaise, des pans de celle-ci s'écroulent fréquemment. D'un volume généralement < 50 m³, ils peuvent exceptionnellement atteindre *c.* 1 000 m³, comme le 09/08/1996 lorsque 11 personnes furent blessées par la vague alors déclenchée (Tinti *et al.*, 1999). Une encoche (*notch*) marque le niveau auquel le lac s'est durablement maintenu pendant la seconde partie de l'été (Figure 6) ; elle reste généralement identifiable au printemps suivant. Du fait de la température positive de l'eau du lac, comprise entre 3°C (-10 m) et 6°C (-1 m) au cœur de l'été (Diolaiuti *et al.*, 2005), la partie immergée de la falaise est soumise à l'ablation. Pouvant dépasser 11°C en surface, l'eau incise l'encoche qui contribue à déstabiliser la partie supérieure de la falaise. Très exposée au rayonnement solaire du fait de son orientation, la falaise reçoit en outre une partie du rayonnement réfléchi par la surface du lac. Cette exposition est d'autant plus efficace que l'albédo de nombreux secteurs de la falaise est très faible à cause du voile de particules noirâtres qui la recouvrent. Les pans de glace qui s'en détachent du fait de l'approfondissement de l'encoche ou de la poussée d'Archimède contribueraient pour *c.* 38 % à l'alimentation du lac – soit la même proportion que l'apport d'eau de fusion par le glacier (Diolaiuti *et al.*, 2006). La part de cette contri-

bution directe de la falaise peut être très supérieure lors de certaines périodes : elle a ainsi représenté *c.* 80 % de l'alimentation du lac entre début juin et mi-juillet 2005 (période toutefois atypique, puisque immédiatement postérieure à la vidange de 2004), l'eau de fusion nivale et glaciaire ne dépassant alors guère 17 % des apports (Masetti *et al.*, 2009).

La position de la falaise est soumise à une double variation, pluriannuelle et saisonnière. La première résulte de la dynamique glaciaire pendant la période considérée. Ainsi, la falaise a avancé de 100-110 m entre 1878 et 1893, réduisant la superficie totale du lac de *c.* 17 650-22 000 m² à *c.* 10 000 m² (Lesca, 1956). 1878 comme 1916 marquent la fin de périodes de retrait d'une vingtaine d'années du glacier du Miage. Le fait que la première ait été plus marquée (retrait du front du glacier de près de 300 m) que la seconde (retrait du front de moins de 150 m) explique probablement une plus grande avancée de la falaise de glace dans le bassin oriental en 1916 (Figure 5). Sacco (1921) note d'ailleurs qu'en 1918 et 1919 « *le glacier s'était considérablement avancé latéralement au lac oriental, allant buter contre l'ancienne moraine de droite* » – représentée en trait pointillé sur sa carte de 1916 (Figure 5). L'observation de la position de la falaise entre 1954 et 2004 (Figure 5) montre qu'elle recule lorsque le glacier est en phase de contraction (1954), avance lorsqu'il connaît une expansion (1974, 1997), puis recule à nouveau lors de la dernière période, caractérisée par un retrait glaciaire (2000, 2003, 2004).

La variation saisonnière de position de la falaise est fonction du bilan entre la vitesse du glacier dans le secteur du lac et l'ablation à laquelle elle est soumise. Les observations montrent que la falaise avance pendant l'hiver *s.l.* puis recule pendant l'été *s.l.*, avec des valeurs dont la différence est traduite par le déplacement pluriannuel. Le suivi de cette évolution par scanner laser sur une période de sept années vise à en éclaircir les modalités tout en la quantifiant.

II - MÉTHODE ET RÉSULTATS DU SUIVI PAR SCANNER LASER DE LA FALAISE DE GLACE

1 - Acquisition et traitement des données

Douze campagnes de mesures à l'aide d'un scanner laser terrestre *Optech* Ilris 3D ont été réalisées en 2003 (23/07), 2004 (04/06 et 08/09), 2005 (06/06 et 20/09), 2006 (21/06 et 05/10), 2007 (18/07), 2008 (24/06 et 10/10), 2009 (17/06) et 2010 (25/06). Les caractéristiques de l'appareil, les conditions de levé, les données acquises, les traitements de celles-ci pour obtenir des modèles 3D du lac du Miage et de sa falaise ainsi que les marges d'erreur sont détaillés par Tamburini *et al.* (2005) et Grange *et al.* (2011). La longueur d'onde de 1 500 nm à laquelle opère l'Ilris 3D n'est pas adaptée au levé de surfaces de glace ou de neige. Toutefois, le

voile de fines particules rocheuses (rendues sombres par l'humidité) qui couvre généralement la majeure partie de la falaise de glace a permis d'acquérir un nombre suffisant de points.

L'ensemble des données acquises et traitées ont été représentées sous forme de cartes (Figure 7), de modèles 3D non maillés (Figure 8) et de deux profils topographiques représentatifs des secteurs ouest et est de la falaise (Figure 9). L'analyse combinée de ces trois formes de représentation obtenues par scanner laser permet de s'affranchir par exemple du biais qui résulterait d'un suivi de l'évolution de la falaise réalisé seulement par quelques profils topographiques réalisés à l'aide d'une station totale. En effet, du fait

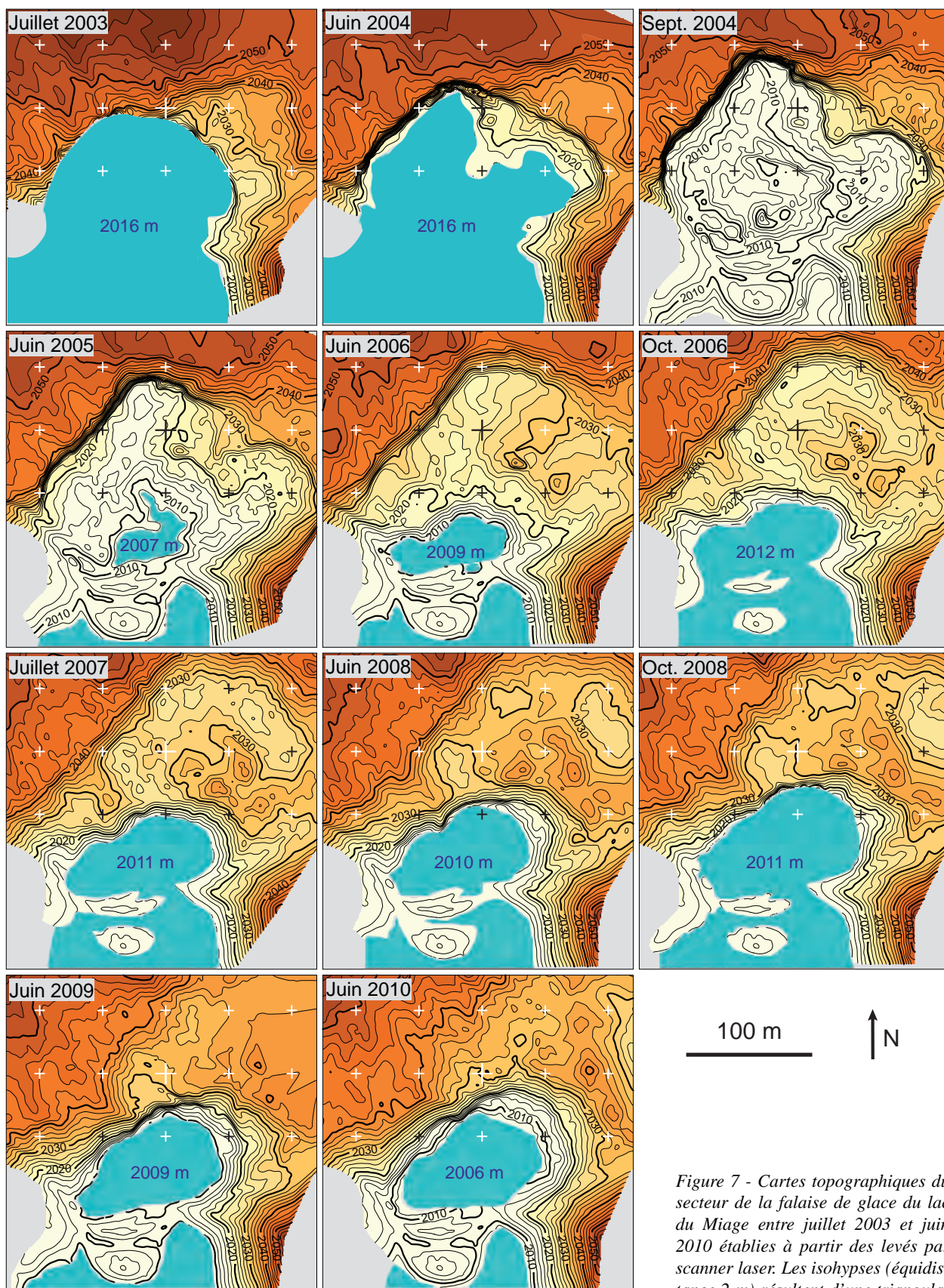


Figure 7 - Cartes topographiques du secteur de la falaise de glace du lac du Miage entre juillet 2003 et juin 2010 établies à partir des levés par scanner laser. Les isohypses (équidistance 2 m) résultent d'une triangulation Delaunay sous le logiciel Surfer

à partir des nuages de points acquis par scanner laser terrestre (certaines isohypses intersectent le plan du lac en raison d'erreurs de triangulation sous Surfer) ; la cote du lac est notée en son centre ; le gris correspond à des secteurs non levés. Toutes les cartes ont 250 m de côté ; carroyage : 50 m. Du fait d'une erreur de consolidation élevée (Grange et al., 2011), la carte de septembre 2005 n'est pas présentée ici.

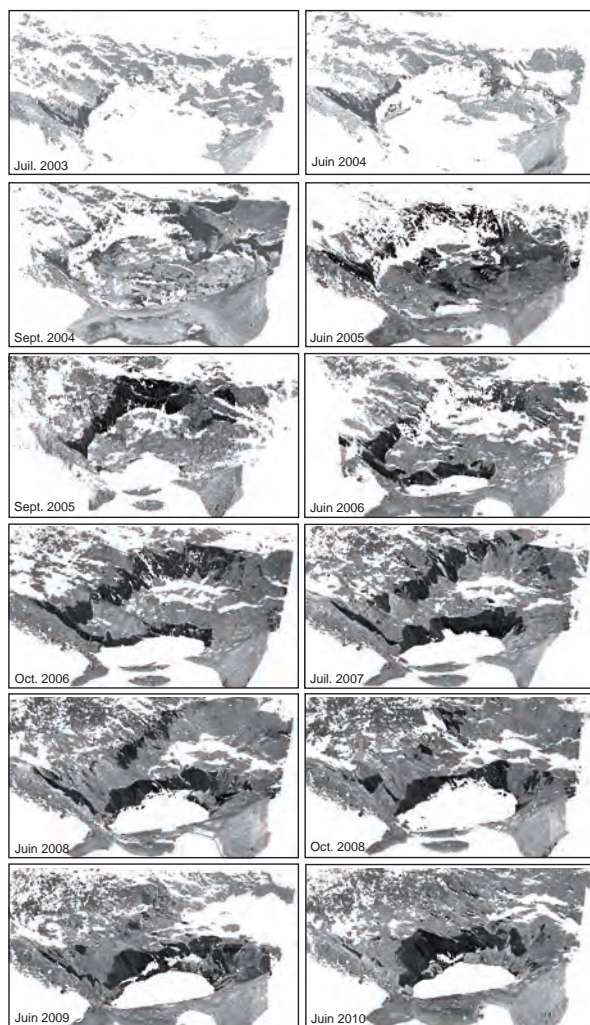


Figure 8 - Vue oblique depuis le sud des assemblages de nuages de points acquis par scanner laser terrestre entre juillet 2003 et juin 2010. Les secteurs en blanc correspondent à une absence de données (masques, surface de glace propre ou surface du lac).

de l'irrégularité de la falaise et selon le tracé du profil retenu, le retrait dans le secteur Ouest par exemple a été de *c.* 20 m (cf. profil A) ou *c.* 45 m (Tamburini *et al.*, 2005 : section A-A) pendant la période juillet 2003 - septembre 2004.

2 - Analyse de la série diachronique obtenue

D'après les données recueillies par scanner laser et l'observation du niveau du lac, l'interaction glacier/lac qui s'exprime par la dynamique de la falaise de glace peut être décomposée entre juillet 2003 et juin 2010 en trois périodes :

a - Période 1 (juillet 2003 - septembre 2004)

La falaise recule de *c.* 20 m dans son secteur ouest (Figure 9 : profil A). Ce recul est d'abord réduit entre

fin juillet 2003 et début juin 2004 : seule une partie de l'ablation de l'été 2003 est ici prise en compte, tandis que l'absence d'ablation pendant l'hiver 2003-2004 combinée à l'écoulement du glacier a entraîné la remontée du plancher de glace en juin 2004 (Figure 7), compensant en partie l'ablation précédente. Le recul s'est en revanche accéléré entre juin et septembre 2004, période où l'ablation est très dominante. Dans le secteur est, la falaise qui culminait à *c.* 2025 m en juillet 2003 s'est déplacée en juin 2004 vers l'est du fait de l'écoulement du glacier et constitue une paléo-falaise culminant à *c.* 2035 m. Le profil du secteur est, régulier et peu raide en juillet 2003 et qui se terminait par une courte falaise subverticale de *c.* 10 m dominant le lac, est devenu accidenté en juin 2004 : le plancher de glace est remonté au minimum de 5 à 10 m ; il n'y a plus de falaise au contact avec le lac, et la paléo-falaise verticale a désormais *c.* 20 m de commandement. En septembre 2004, cette paléo-falaise est redevenue falaise active du fait de l'ablation. Verticale et haute d'une dizaine de m, elle présente une section peu raide formant un cap, car protégée de l'action du lac par la forte accumulation de débris rocheux hétérométriques à son pied (Figure 8). Le recul de la falaise dans le secteur est est d'autant plus marqué qu'au déplacement du glacier se combine une ablation qui opère sur un secteur en gradins : une fois « raboté » le plancher de glace qui a été exondé pendant l'hiver et la paléo-falaise atteinte, celle-ci devenue falaise active continue à reculer, plus lentement à cause de sa plus grande hauteur. Modulée selon l'épaisseur de la couverture détritique, l'ablation glaciaire est également active à la surface du glacier qui prolonge la falaise, entraînant son abaissement.

Cette période est représentative d'un fonctionnement « normal » du système glacier/lac en période de bilan de masse glaciaire négatif. Dans le secteur est, le recul annuel de la falaise qui résulte du jeu saisonnier et combiné de l'ablation et de l'écoulement du glacier produit, par cumul pluriannuel, le retrait marqué de la falaise vers l'est et l'extension maximale du lac (*e.g.* comme en 1954 ou 2004). Dans le secteur ouest, le recul estival de la falaise est compensé par l'écoulement hivernal du glacier : au-delà de ses variations saisonnières, la position de la falaise y reste remarquablement constante sur la période 1954-2010 (Figure 5).

b - Période 2 (septembre 2004 - octobre 2008)

La falaise est ouverte par la vidange rapide de septembre 2004, qui entraîne la modification du fonctionnement du système glacier/lac. Le plancher de glace qui était régulièrement « raboté » l'été jusqu'en 2004 est définitivement exondé à partir de l'automne 2004 : non seulement il est remonté de *c.* 10 m dans le secteur est en juin 2005, mais le lac qui se forme alors est très peu étendu, avec un niveau inférieur de 10 m à celui de juin 2004 (Figure 7), et n'est donc pas en mesure

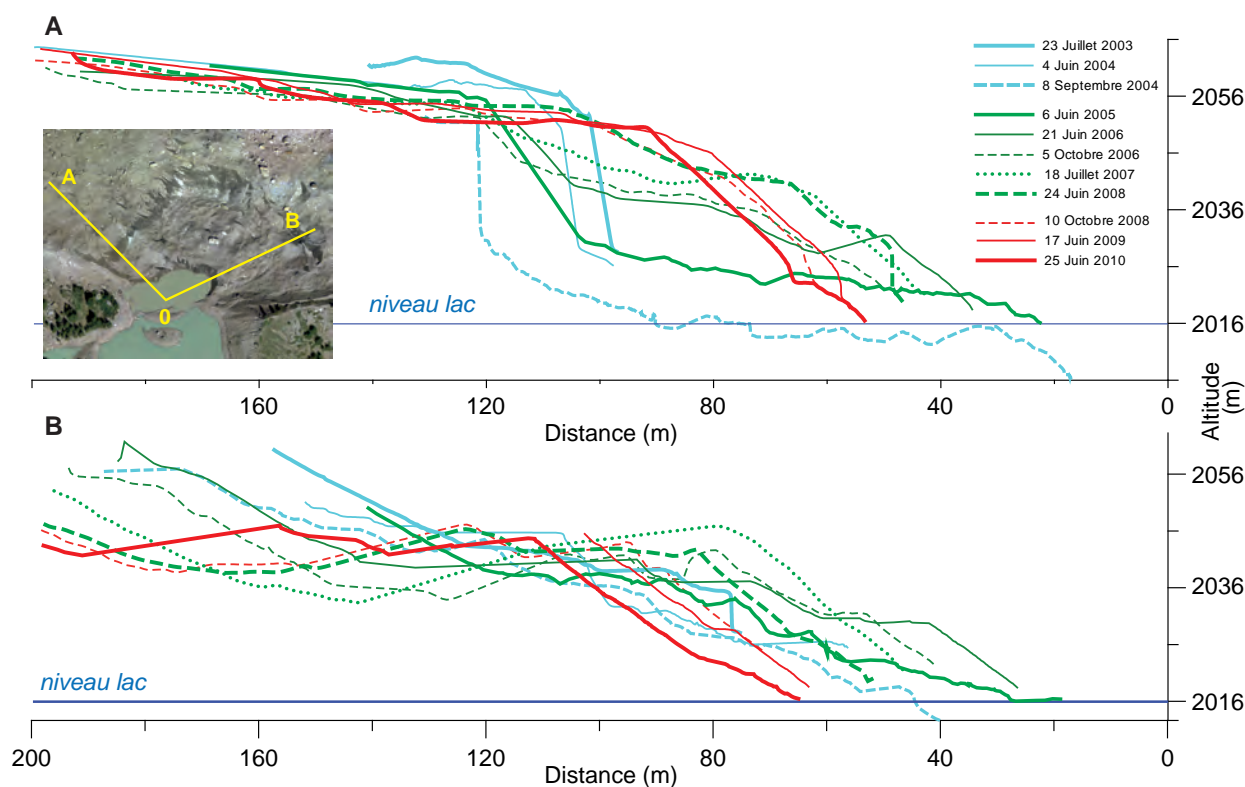


Figure 9 - Profils topographiques de la falaise de glace du lac du Miage entre juillet 2003 et juin 2010. Le niveau du lac indiqué (2 016 m) correspond à sa cote maximale, non atteinte depuis septembre 2004.

de le soumettre à l'ablation thermique et mécanique ordinaire. Ce paléo-plancher devient un simple secteur de la surface du glacier, soumis malgré sa couverture détritique à l'ablation par la radiation solaire. Le nouveau plancher qui s'est formé sous le petit lac a une extension très réduite, ce qui a interrompu le rôle accélérateur du recul estival de la falaise du secteur est qu'il a dans le fonctionnement « normal » du système glacier/lac. En 2006, le lac nord s'est agrandi mais sa superficie reste très inférieure à celle du lac du reste du bassin oriental (Figure 5). Mais l'élément notable est la formation d'une falaise continue sur toute la marge glaciaire en contact avec le lac (Figure 8), de c. 10 m de commandement (Figure 7). Elle indique qu'une 2^e phase a débuté, caractérisée par la reprise de l'action d'ablation due au lac. La paléo-falaise est presque régularisée dans son secteur est ; son secteur ouest progresse lentement vers l'est (Figure 9 : profil A) – en dépit de l'ablation à laquelle elle est soumise – et s'atténue : son commandement n'est plus que de c. 10 m en octobre 2006, tandis que le paléo-plancher de glace est désormais remonté de c. 20 m depuis septembre 2004 (Figure 7). Cette évolution se poursuit en 2007 et début 2008 : la falaise active est haute de c. 20 m ; le secteur ouest de la paléo-falaise, qui a avancé de c. 40 m depuis septembre 2004 (Figure 9 : profil A), se régularise ; le paléo-plancher de glace s'est encore élevé de c. 10 m.



Figure 10 - Déplacement de 8 blocs rocheux à la surface du glacier du Miage entre juillet 2003 et juin 2010. Numéro et trajet des blocs en jaune ; vecteur et valeur (en m/an) de leur vitesse moyenne annuelle de déplacement en rouge ; pour leur lisibilité, l'échelle des vecteurs diffère de celle du fond et des trajets (orthophotographie RAVA 2006).

c - Période 3 (octobre 2008 - juin 2010)

Alors que la paléo-falaise est désormais presque entièrement régularisée, le recul de la falaise active et l'avancée de la paléo-falaise permet leur fusionnement dans le secteur ouest, avec une raide falaise ouest haute de c. 35 m en juin 2010. A la fin de l'été 2009, le lac nord atteint une superficie comparable à celle du lac du bassin oriental (Figure 5) – mais toujours très inférieure à celle qu'il avait en 2004. En dépit de ce petit lac dont le niveau reste déprimé dans un bassin nord réduit, le système glacier/lac semble avoir retrouvé sa configuration « normale » et l'équilibre dynamique qui prévalait avant la rupture introduite par la vidange de 2004.

De nombreux blocs rocheux de la couverture détritico-supraglacière ont été relevés lors des campagnes de scanner laser car situés en arrière de la falaise. Huit d'entre eux, reconnaissables d'une année à l'autre, ont été utilisés pour mesurer la direction et la vitesse de l'écoulement superficiel du glacier (Figure 10). Le parcours régulier de tous les blocs à l'exception du bloc 8 situé sur le plancher de glace suggère qu'ils ont

été peu affectés par les effets de l'ablation différentielle et sont de bons marqueurs de l'écoulement du glacier dans ce secteur. Durant la période 2003-2010, la vitesse moyenne du glacier était comprise entre 22 et 26 m/an à l'écart du secteur de la paléo-falaise. Dans ce dernier, le bloc 6 s'est déplacé à une vitesse de 28 m/an du fait de son accélération entre octobre 2006 et juin 2008 à l'occasion du franchissement de la paléo-falaise (par glissement ou roulement). La vitesse de 17 m/an du bloc 7 semble résulter du gradient de vitesse entre le centre et la marge du glacier ; il n'a toutefois été suivi que jusqu'en 2007 (avant d'être masqué), tandis qu'il ne s'est déplacé que de 8 m lors des 13 derniers mois de son suivi, à cause d'un glissement probable dans une direction différente de celle de l'écoulement du glacier (topographie locale accidentée sous l'effet de l'ablation différentielle) ; sa vitesse moyenne doit donc être considérée avec prudence. Enfin, le parcours du bloc 8 montre qu'il a été « ballotté » lors de l'évolution du plancher pendant la période d'étude, ce qui explique sa faible vitesse relative.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le suivi de l'évolution de la falaise de glace du lac du Miage par scanner laser terrestre depuis 2003 montre que la vidange de septembre 2004 a introduit une rupture durable dans le fonctionnement « normal » du système glacier/lac dont la dynamique de la falaise est la résultante (Figure 11). Avant la vidange, le cycle annuel fait se succéder (i) une phase été-automne, avec une falaise raide en recul et un plancher de glace ennoyé après qu'il a été « raboté » : la falaise recule ; (ii) une phase hiver-printemps, caractérisée par la remontée du plancher de glace (e.g. + 2,60 m en mai 2000 par rapport à l'automne 1999) : la falaise continue à reculer à l'est, mais avance faiblement à l'ouest (écoulement du glacier). Le cumul de ces cycles annuels produit une extension majeure du lac (e.g. 2004). Après la vidange, il y a découplage entre la falaise et le lac, d'abord de faible extension ; tandis que le plancher de glace remonte d'une dizaine de mètres par an, la paléo-falaise se régularise tout en se déplaçant vers l'est ; une néo-falaise active se développe en même temps que le lac, jusqu'à fusionner avec une partie de la paléo-falaise ouest.

Le recul de la falaise du fait de l'action thermique et mécanique du lac aurait été de 30-35 m/an dans la période qui précédait la vidange de 2004 (Diolaiuti *et al.*, 2006), avec des valeurs maximales de 20 m à 45 m selon les secteurs pour 2003-2004 (Tamburini *et al.*, 2005). Suite à la vidange, le recul de la paléo-falaise est ne résulte plus que de l'ablation par le rayonnement solaire – d'où sa rapide régularisation – et du déplacement du glacier, tandis que la paléo-falaise ouest avance lentement.

Depuis la vidange de 2004, le niveau maximal du lac en fin d'été est toujours resté 4-5 m sous la cote 2016 m contrôlée par l'exutoire, ce qui a limité son action sur la marge du glacier. La surface de la falaise affectée par l'action du lac étant moindre, sa contribution à l'alimentation en eau du lac par fusion directe et détachement de pans de glace s'en trouve réduite, ce qui participe à maintenir le niveau déprimé du lac. Par ailleurs, le recul de la falaise s'accompagne dans certains secteurs d'une rétroaction négative introduite par la décharge de matériel rocheux depuis la couverture détritico-supraglacière : lorsque le plancher de glace est sub-affleurant, ces débris hétérométriques s'accumulent au pied de la falaise et entravent l'ablation thermique (protection contre la radiation solaire) et mécanique (sapement de la base de la falaise) de la glace.

La très forte turbidité du lac estival résulte de son alimentation par l'eau de fusion glaciaire et nivale – cette turbidité étant fortement réduite au printemps par la décantation hivernale. L'eau de fusion nivale qui provient du glacier du Miage circule dans une bédrière faiblement incisée à la surface du manteau nival préservé, le long de la moraine latérale droite ; elle se charge en fines lorsqu'elle traverse les secteurs non enneigés de la couverture détritico-supraglacière. Depuis le bassin nord, cette eau turbide remplissait progressivement l'ensemble du lac, car la partie supérieure du seuil morainique qui sépare les bassins nord et sud-est était caractérisée jusqu'en 2005 par une forte conductivité hydraulique (Masseti *et al.*, 2009). Depuis 2009

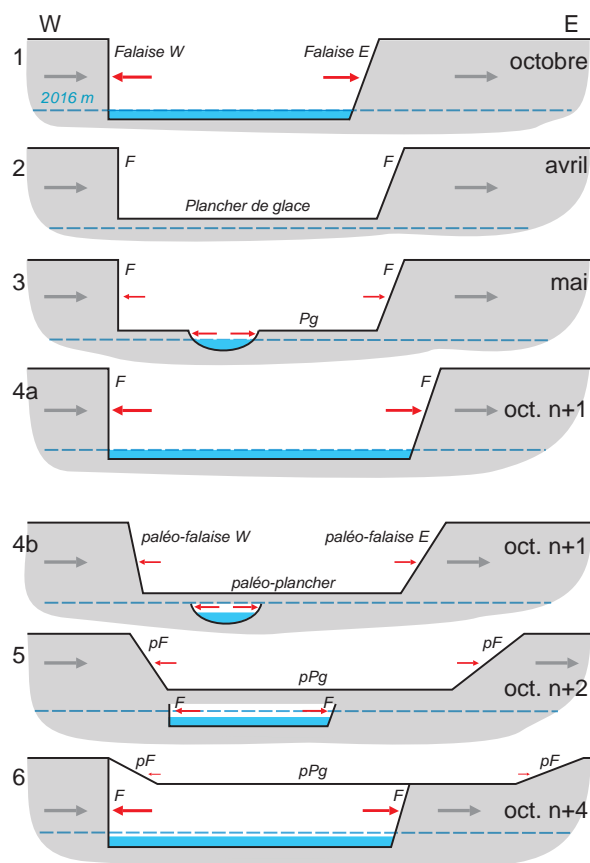


Figure 11 - Dynamique de la falaise de glace du lac du Miage. Flèches grises : écoulement du glacier (considéré ici comme constant) ; flèches rouges : ablation glaciaire (leur taille est fonction de son intensité). F : falaise ; pF : paléo-falaise ; Pg : plancher de glace ; pPg : paléo-plancher de glace ; ligne tirée bleue : niveau maximal du lac (2016 m) ; 1 à 4a : cycle annuel en fonctionnement « normal » (e.g. < 2004 et > 2008) ; 4b à 6 : fonctionnement perturbé par une vidange rapide survenue lors de l'année n (e.g. 2005-2008).

toutefois, les lacs d'été des bassins oriental et occidental présentent une transparence inhabituelle (2-3 m), leur couleur bleu turquoise contrastant avec le vert laiteux du bassin nord (Figure 5). Une légère différence de couleur entre le bassin nord et le reste du lac étant apparue à partir du printemps 2006, cela suggère un processus de tassements internes transformant progressivement ce seuil morainique en filtre à particules – tout en préservant une bonne conductivité hydraulique comme l'atteste le niveau d'eau commun à ces bassins. Ces tassements pourraient avoir été favorisés par l'exondation très fréquente et durable de ce seuil morainique depuis la vidange de 2004.

La vitesse moyenne d'écoulement de 22-26 m/an en 2003-2010 dans le secteur du glacier du Miage au nord du lac est inférieure à celles mesurées pour les périodes 1965-1970 (33 m/an ; Lesca, 1974), 1975-1991

(33 m/an ; Casati, 1998) et 1997-2003 (34 m/an ; Zamparutti, 2009) – étonnamment constantes ; elle concorde avec la valeur déterminée par photogrammétrie par Zamparutti (2009) pour la période 2003-2008 (21,5 m/an). Ces vitesses traduisent donc un ralentissement de l'écoulement du glacier qui semble débiter (au moins dans son coude) en 2003. Ce ralentissement ne semble pas être un élément d'explication de l'occurrence de la vidange de 2004, puisque 5 vidanges ont eu lieu entre 1966 et 1991. Notre suivi du système lac/falaise par scanner laser ayant commencé en 2003, on ne peut pas en conséquence observer les éventuels effets de ce ralentissement sur sa dynamique à partir de ces seules données.

L'une des limites rencontrées dans la comparaison de ces 12 levés à partir de leurs différentes représentations tient au fait que les dates de ces levés ne sont pas toujours correspondantes : comparer par exemple les deux levés des 23/07/2003 et 04/06/2004, considérés comme représentant l'état du système en début d'été pour ces deux années alors qu'ils sont décalés de plus d'un mois et demi, introduit un biais. D'autre part, la comparaison de deux levés annuels réalisés aux mêmes dates n'intègre pas la variabilité annuelle en termes d'épaisseur et durée du manteau neigeux ou de températures estivales. Une autre limite tient à la difficulté d'appréhender l'évolution d'un système complexe à partir de séries de cartes et profils topographiques. Faute d'un mode de représentation satisfaisant des données scanner laser, on est conduit à dégrader le niveau d'information obtenue pour parvenir à la traiter, et ces représentations 2D d'objets 3D dont la dimension temporelle est rendue par leur multiplication ne traduisent que maladroitement une dynamique 4D. Une dernière limite résulte de l'effet de la dynamique du système sur la qualité de la mesure. Dans le cas présent, avec le modèle de scanner laser utilisé, la qualité de la mesure s'est accrue avec le « dérèglement » du système : la transformation de la falaise active, verticale et sans débris du fait de son recul actif, en une paléo-falaise en cours de régularisation et couverte de débris fins a permis de limiter les secteurs sans données, nombreux en 2003 et 2004.

Malgré ces limites, le suivi par scanner laser terrestre de la falaise de glace du lac du Miage sur la période 2003-2010 s'est avéré être une méthode pertinente pour reconstituer l'évolution de ce système glacier/lac. La compréhension de son fonctionnement et de sa perturbation temporaire suite à la vidange rapide de 2004 permet d'envisager un espacement des campagnes de mesure à deux ans si la période ouverte en 2008 se prolonge. Ce suivi par scanner sur un pas de temps plus long sera complété par les visites régulières ; il pourrait l'être également par la mise en œuvre d'autres outils permettant un suivi en continu de certains paramètres (e.g. capteurs de pression pour le suivi de la hauteur d'eau dans les différents bassins).

Remerciements

Un remerciement particulier est adressé à tous ceux qui ont participé aux acquisitions des données sur le terrain depuis 2003: Massimo Broccolato, Dario Conforti, Stephan Gruber, Marion Guisset, Paolo Federici, Emmanuel Malet, Romain Mazué, Gianni Mortara, Antoine Rabatel, Ludovic Ravel et André Roveyaz. Les corrections, remarques et propositions des deux relecteurs (Ludovic Ravel et Xavier Bodin) ont permis d'améliorer très sensiblement une première version.

BIBLIOGRAPHIE

- BARETTI M., 1880. Il ghiacciaio del Miage. Versante italiano del gruppo del Monte Bianco (Alpe Pennine). *Memoria della Reale Accademia delle Scienze di Torino*, 2, 38, 3-36.
- CAPELLO C.F., 1940. I laghi glaciali del Miage. *L'Universo*, 21, 685-705.
- CASATI, D., 1998. *Studio della dinamica di un debris-covered glacier : il Ghiacciaio del Miage*. Tesi di laurea, Università di Milano, Milano, 249 p.
- CERUTTI A.V., 1951. Le vicende del lago Miage. *Augusta Praetoria*, 4, 1, 26-35.
- CHIARLE M., 2000. *Analisi dei pericoli naturali in ambiente glaciale*. Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 206 p.
- DELINE P., 1999. La mise en place de l'amphithéâtre morainique du Miage (Val Veny, Val d'Aoste). *Géomorphologie*, 1, 59-72.
- DELINE P., OROMBELLI G., 2005. Glacier fluctuations in the western Alps during the Neoglacial as indicated by the Miage morainic amphitheatre (Mont Blanc massif, Italy). *Boreas*, 34, 1-12.
- DELINE P., DIOLAIUTI G., KIRKBRIDE M.P., MORTARA G., PAVAN M., SMIRAGLIA C., TAMBURINI A., 2004. Drainage of ice-contact Miage Lake (Mont Blanc Massif, Italy) in September 2004. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 27, 2, 113-119.
- DIOLAIUTI G., KIRKBRIDE M.P., SMIRAGLIA C., BENN D.I., D'AGATA C., NICHOLSON L., 2005. Calving processes and lake evolution at Miage Glacier (Mont Blanc, Italian Alps). *Annals of Glaciology*, 40, 207-214.
- DIOLAIUTI G., CITTERIO M., CARNIELLI T., D'AGATA C., KIRKBRIDE M.P., SMIRAGLIA C., 2006. Rates, processes and morphology of freshwater calving at Miage Glacier (Italian Alps). *Hydrological Processes*, 20, 2233-2244.
- FORBES J.D., 1843. *Travels through the Alps of Savoy and others parts of the Pennine chain*. Black, Edinburgh, 460 p.
- GRANGE C., VILLEMIN T., JAILLET S., DELINE P., PLOYON E., TAMBURINI A., 2011. Consolidation par optimisation en vue d'une analyse diachronique par scanner laser terrestre de la falaise de glace du lac du Miage (massif du Mont Blanc). *Collection EDYTEM*, 12, 85-94.
- LESCA C., 1956. Osservazioni sui laghi del ghiacciaio del Miage. *Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano*, 7, 29-55.
- LESCA C., 1974. Emploi de la photogrammétrie analytique pour la détermination de la vitesse superficielle des glaciers et des profondeurs relatives. *Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano*, 22, 169-186.
- MASETTI M., DIOLAIUTI G., D'AGATA C., SMIRAGLIA C., 2009. Hydrological characterization of an ice-contact lake: Miage Lake (Monte Bianco, Italy). *Water Resources management*, 24, 8, 1677-1696.
- MERCALLI L., CAT BERRO D., MORTARA G., TAMBURINI A., 2002. Un lago sul ghiacciaio del Rocciamezone, Alpi occidentali: caratteristiche e rischio potenziale. *Nimbus*, 7, 1-4, 3-9.
- MORTARA G., MERCALLI L., 2002. Il lago epiglaciale sul ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Monte Rosa. *Nimbus*, 7, 1-4, 10-17.
- MORTARA G., TAMBURINI A. (Eds.), 2009. *Il Ghiacciaio del Belvedere e l'emergenza del Lago Effimero*. Società Meteorologica Subalpina, Bussoleno, 191 p.
- OROMBELLI G., DELINE P., 2002. L'anfiteatro morenico del Miage (Courmayeur, Valle d'Aosta) : nuovi dati sulla sua genesi. *Rendiconti Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere*, B 134, 115-133.
- PEILLEX J.-M., TOURNAIRE P., 2010. *Menace sur Saint-Gervais*. Editions Catapac, Perpignan, 111 p.
- SACCO F., 1917. L'apparato morenico del ghiacciaio del Miage (gruppo del Monte Bianco). *Bolletino della Società Geologica Italiana*, 36, 323-354.
- SACCO F., 1921. La crue actuelle des glaciers dans la Vallée d'Aoste. *Augusta Praetoria*, 7-8-9-10.
- SAUSSURE H.B. de, 1786. *Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*. Tome second. Barde, Manguet & Compagnie, Genève, XVI + 641 p.
- TAMBURINI A., DELINE P., MORTARA G., 2005. Time-space modeling with terrestrial Lidar. Monitoring ice cliff evolution of the Miage Glacier, Italy, with ILRIS-3D. *GIM International*, 19, 11, 31-33.
- TINTI S., MARAMAI A., CERUTTI A.V., 1999. The Miage Glacier in the Valley of Aosta (Western Alps, Italy) and the extraordinary detachment which occurred on August 9, 1996. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 157-161.
- VINCENT C., AUCLAIR S., LE MEUR E., 2010a. Outburst flood hazard for glacier-dammed Lac de Rochemelon, France. *Journal of Glaciology*, 56, 195, 91-100.
- VINCENT C., GARAMBOIS S., THIBERT E., LEFEBVRE E., LE MEUR E., SIX D., 2010b. Origin of the outburst flood from Glacier de Tête Rousse in 1892 (Mont Blanc area, France). *Journal of Glaciology*, 56, 198, 688-698.
- ZAMPARUTTI P., 2009. *Il Ghiacciaio del Miage: cartografia geomorfologica e studio della copertura detritica attraverso tecniche di fotogrammetria digitale e telerilevamento*. Tesi di laurea magistrale, Università di Torino, Torino, 221 p.

LES DONNÉES LASER TERRESTRE À HAUTE RÉOLUTION POUR LE SUIVI DE LA CHARGE DE FOND DANS LES TRONÇONS TORRENTIELS

RETOURS D'EXPÉRIENCES

*HIGH-RESOLUTION BEDLOAD SEDIMENT FOLLOW-UP IN TORRENTIAL SECTIONS
BY TERRESTRIAL LASER SCANNING
EXPERIENCE FEEDBACKS*

LAURENT ASTRADE, ESTELLE PLOYON, STÉPHANE VEYRAT-CHARVILLON

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

Contact : laurent.astrade@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

La quantification à haute résolution du transit sédimentaire dans les systèmes torrentiels par l'utilisation du LiDAR terrestre est particulièrement prometteuse pour la connaissance de la dynamique (quantification des volumes, durée de stockage) et pour la gestion des ouvrages de protection (suivi du remplissage, programmation des curages). Toutefois, la situation particulière de ces milieux et les conditions de levés difficiles qui en découlent rendent les étapes de traitement complexes et imposent des opérations complémentaires. Ce texte présente un premier retour d'expérience sur le suivi numérique de nappes caillouteuses par la comparaison de MNT à haute résolution de quatre tronçons torrentiels dans les Alpes du nord. Il vise à mettre en exergue les difficultés rencontrées, les choix réalisés et les enseignements tirés pour affiner le protocole d'acquisition de données laser terrestre et améliorer les traitements.

MOTS-CLÉS : CHARGE SÉDIMENTAIRE, TRANSIT SÉDIMENTAIRE, TORRENT, MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN, LiDAR TERRESTRE.

ABSTRACT

The high-resolution quantification of the sediment transit in mountain streams by the use of terrestrial laser scan is particularly promising for the dynamic knowledge (volumes, time-storage) and for the protection works management (filling follow-up, clearing planning). However, the singular situation of those environments and the difficult survey conditions produce complex stages of treatment and dictate additional operations. This text presents an experience feedback on the sediment transport by comparison of high-resolution digital terrain models of four torrential sections in the Northern Alps. It aims to refine the terrestrial laser data acquisition protocol and then improve treatments.

KEYWORDS: BEDLOAD, SEDIMENT TRANSPORT, MOUNTAIN STREAM, DIGITAL ELEVATION TERRAIN MODEL, TERRESTRIAL LASER SCAN.

INTRODUCTION

La connaissance du transit de la charge de fond des cours d'eau est indispensable aujourd'hui, tant pour la protection des activités humaines que, dans le contexte de pénurie sédimentaire qui affecte les vallées, pour l'identification des sites susceptibles de réalimenter les cours d'eau en sédiments (maintien de la qualité des habitats écologiques, lutte contre la déstabilisation des ouvrages et le rabattement des nappes alluviales). De nombreuses méthodes ont été mises en œuvre. Certaines travaillent sur les éléments isolés : mesure de la MES (Matière En Suspension ; Peiry, 1996) et de la charge de fond (Liébault, 2003), utilisation de géophones (Arattano, 2003) ou de vidéos (Lavigne et Thouret, 2003), suivi du trajet des matériaux à l'aide de marqueurs (Spieker et Ergenzinger, 1990) ; d'autres sur l'ensemble du volume sédimentaire en transit : comparaison de cartes mon-

trant la métamorphose fluviale (Salvador, 1991), pistage des scories minières (Houbrechets et Petit, 2003), utilisation de marqueurs végétaux (Astrade *et al.*, sous presse). C'est également l'objectif des approches topographiques vers lesquelles se sont tournées depuis de nombreuses années les études en géomorphologie fluviale pour mesurer la charge sédimentaire en transit. Sur les cours d'eau, l'échantillonnage topographique a dans un premier temps été adapté à leur forme longiligne en se restreignant au profil en long et à des profils en travers équidistants (Landon, 1999). L'évolution des appareils de mesure et des outils informatiques a permis des avancées significatives en termes d'acquisition et de précision des mesures, permettant alors de comparer des états de surface et de quantifier l'évolution des formes dans le temps.

I - UNE DISCRÉTISATION DES ESPACES FLUVIAUX

1 - Les modèles numériques de terrain

L'élaboration de Modèles Numérique de Terrain (MNT) est une technique largement privilégiée en géomorphologie (Kondolf et Larson, 1995 ; Rumsby *et al.*, 2008 ; Wheaton *et al.*, 2010 ; Milan *et al.*, 2011). En réitérant les mesures, l'analyse diachronique par soustraction des MNT est rapide ; elle nécessite simplement d'adapter la fréquence des mesures à la vitesse d'évolution du processus étudié et le maillage à l'échelle des formes suivies. Les outils utilisés sont les niveaux, théodolites ou tachéomètres, télémètres laser associés à une boussole électronique, précis mais délicats à utiliser en terrain accidenté. Plus récemment, l'utilisation du GPS a permis de lever plus rapidement et en plus grande quantité des données topométriques (Brasington *et al.*, 2000, 2003) ; mais le problème de masque limitant la connexion aux satellites (fréquent dans les forêts alluviales ou les gorges torrentielles) limite leur utilisation. Toutes ces techniques nécessitent un investissement en temps sur le terrain important pour obtenir une répartition régulière et en nombre suffisant des points de mesure.

La photogrammétrie aérienne constitue une alternative qui présente plusieurs avantages : augmentation du nombre de points et de la fréquence des mesures, possibilité de mesurer sans accéder au site, moindre coût (Lane *et al.*, 1993 ; Veyrat-Charvillon et Memier, 2006 ; Rumsby *et al.*, 2008). Elle a ainsi offert un outil idéal pour étudier les changements topographiques moyens causés par exemple par les laves torrentielles (Brunsdon, 1993). Mais elle a aussi ses limites en zone boisée ou en montagne où les masques sont fréquents. De plus, il faut des photographies aériennes à des échelles permettant d'appréhender l'objet étudié afin

que les maillages des MNT soient adaptés à la dimension des formes et des processus étudiés. Classiquement produites à des échelles comprises entre 1/15 000 et 1/30 000, elles sont plus adaptées à l'étude des bassins versants ou des cours d'eau de plaine alluviale. Pour travailler sur des formes infra-métriques, il convient de procéder à un levé photographique à basse altitude ; la technique est éprouvée mais nécessite un investissement préalable dans l'acquisition des données.

2 - Les données laser

Les avancées techniques récentes ont permis le développement de méthodes de mesures basées sur le LiDAR (Light Detection And Ranging). Le LiDAR spatial (ou aéroporté) est un outil en plein développement en dynamique fluviale et torrentielle (Bowen et Waltermire, 2002 ; Hauer *et al.*, 2009 ; Heritage et Hetherington, 2007 ; Jones *et al.*, 2007 ; Milan *et al.*, 2007 ; Murphy *et al.*, 2008 ; Notebaert *et al.*, 2009 ; Scheidl *et al.*, 2008). Mais il reste utilisable, avant tout, là où les emprises spatiales des objets à analyser sont suffisantes par rapport à la résolution des levés. En zone de montagne, cette technologie est limitée par l'énergie du relief et nécessite plutôt des moyens hélicoptérés, encore difficiles à mettre en œuvre.

C'est pourquoi le LiDAR terrestre est une solution qui mérite d'être développée (Heritage et Milan, 2009 ; Heritage *et al.*, 2009), d'autant plus que les résolutions d'acquisition sont potentiellement meilleures puisque le dispositif n'est pas en mouvement (l'aérien nécessite une géolocalisation en temps réel qui conduit à une résolution et une précision moindres). L'intérêt réside donc dans le fait que les modèles haute-définition

nécessaires pour l'étude diachronique des phénomènes à l'intérieur du chenal torrentiel ne peuvent être envisagés qu'au moyen de technique permettant le relevé rapide de nuage de points 3D. Le but est d'obtenir, sur un linéaire restreint d'un torrent mais stratégique pour l'évaluation du transit sédimentaire, des états de surface successifs avec un niveau de détail suffisant pour visualiser les formes intra-chenal (bourrelets, chenaux, blocs, etc) et pour quantifier les évolutions (érosions, dépôts).

3 - Le suivi torrentiel par laser terrestre à haute résolution

Ce texte présente un premier retour d'expérience sur le suivi numérique à haute résolution de nappes caillouteuses de quatre tronçons torrentiels des Alpes du Nord. Le premier est celui du torrent de la Lampe (Saint-Paul de Varcès, massif du Vercors ; Figures 1 a et 3 a), lourdement aménagé par des ouvrages de correction (47 seuils, 3 digues, 1 plage de dépôt), dont une série de 6 seuils imposants érigés à différentes époques (la plus récente en 2002) à l'apex du cône de déjection. Juste à l'aval de la zone de production sédimentaire, ces ouvrages constituent des pièges à sédiments intéressants pour l'évaluation des quantités de matériaux entrants dans le système. Ce site (long de 170 m, large de 50 m, sur 45 m de dénivellation) est suivi depuis 2005.

Le deuxième site est celui du torrent de la Glacière (Chapareillan, massif de la Chartreuse ; Figures 1 b et 4 a). Alimenté par les éboulis de l'escarpement du Granier, le torrent présente depuis quelques années un phénomène d'incision et d'avulsion du chenal en rive droite qui préoccupe les gestionnaires locaux. Un suivi géomorphologique a été mis en place : levé par laser terrestre (2009), relevé GPS de points de calage, observatoire photographique (boîtiers appareil photo/batterie/capteurs), étude rétrospective classique (photographies aériennes, archives documentaires, archives naturelles).

Les deux derniers sites sont dans la vallée de Chamonix (confluences Arve/Arveyron d'Argentière et Arve/Creusaz ; Figures 1 c et 5 a) où le transport solide est un enjeu majeur (contrôle des crues dans un contexte de forte occupation). Suite aux événements torrentiels de juillet 1996, plusieurs ouvrages de contrôle de la charge sédimentaire ont été édifiés dans les lits, dans lesquels des curages sont régulièrement effectués. Depuis 2003, des suivis topographiques des curages et des remplissages sont réalisés, par un géomètre, au moyen de profils en travers. Dans le but d'affiner le suivi, de comprendre la dynamique sédimentaire pour évaluer la pertinence du mode de gestion actuel et, plus largement, d'étudier le fonctionnement hydromorphologique des affluents de l'Arve, une première campagne de levés numériques a été réalisée en novembre 2010.

II - MISES EN ŒUVRE

Les différentes étapes nécessaires à la réalisation des modèles numériques de terrain haute-densité en milieu torrentiel sont exposées. Un intérêt particulier est porté aux contraintes du terrain, aux biais induits et à leurs incidences sur la qualité des modèles obtenus.

1 - Acquisition

Les données sont acquises au moyen d'un scanner laser terrestre longue portée Ilris3D-Optech, propriété du laboratoire Edytem depuis 2005 (Figure 2). Les dimensions submétriques des formes étudiées et les variations d'ampleurs décimétriques (à l'échelle annuelle) imposent de rester dans une résolution proche de la granulométrie maximale des matériaux transportés et de viser une précision des résultats de l'ordre de la dizaine de centimètres. La résolution d'acquisition sur le terrain (réglages dans le protocole d'acquisition du laser) a alors été fixée entre 3 et 3,5 cm (XYZ). Les données topographiques sont traitées à l'aide des logiciels Polyworks (assemblage et pré-traitement) et 3DReshaper (maillage 3D) pour obtenir les MNT denses. La difficulté à cette

étape est liée au fait que les emplacements à partir desquels sont réalisées les acquisitions se trouvent au sein même de l'objet à topographier, au mieux sur ses limites (rives), empêchant d'avoir l'objet dans son intégralité – ou même des visées embrassant de larges secteurs du site – et imposant de nombreuses stations et déplacements du capteur.

2 - Assemblage des nuages de points

L'assemblage des nuages de points est réalisé par la méthode du « *best-fit* » (Polyworks), basée sur un algorithme itératif qui tente d'optimiser l'alignement des nuages de points selon le principe d'une minimalisation des distances 3D entre les surfaces de recouvrement des différentes scènes acquises à partir de points de vue différents. A chaque itération, l'algorithme multiplie chaque nuage de points par une matrice de transformation en utilisant une régression linéaire des moindres carrés. A ce stade, le nombre conséquent de nuages de points pour chaque campagne de mesures (Figures 3 b et 5 b) et les visées croisées et surtout rasantes, qui multi-

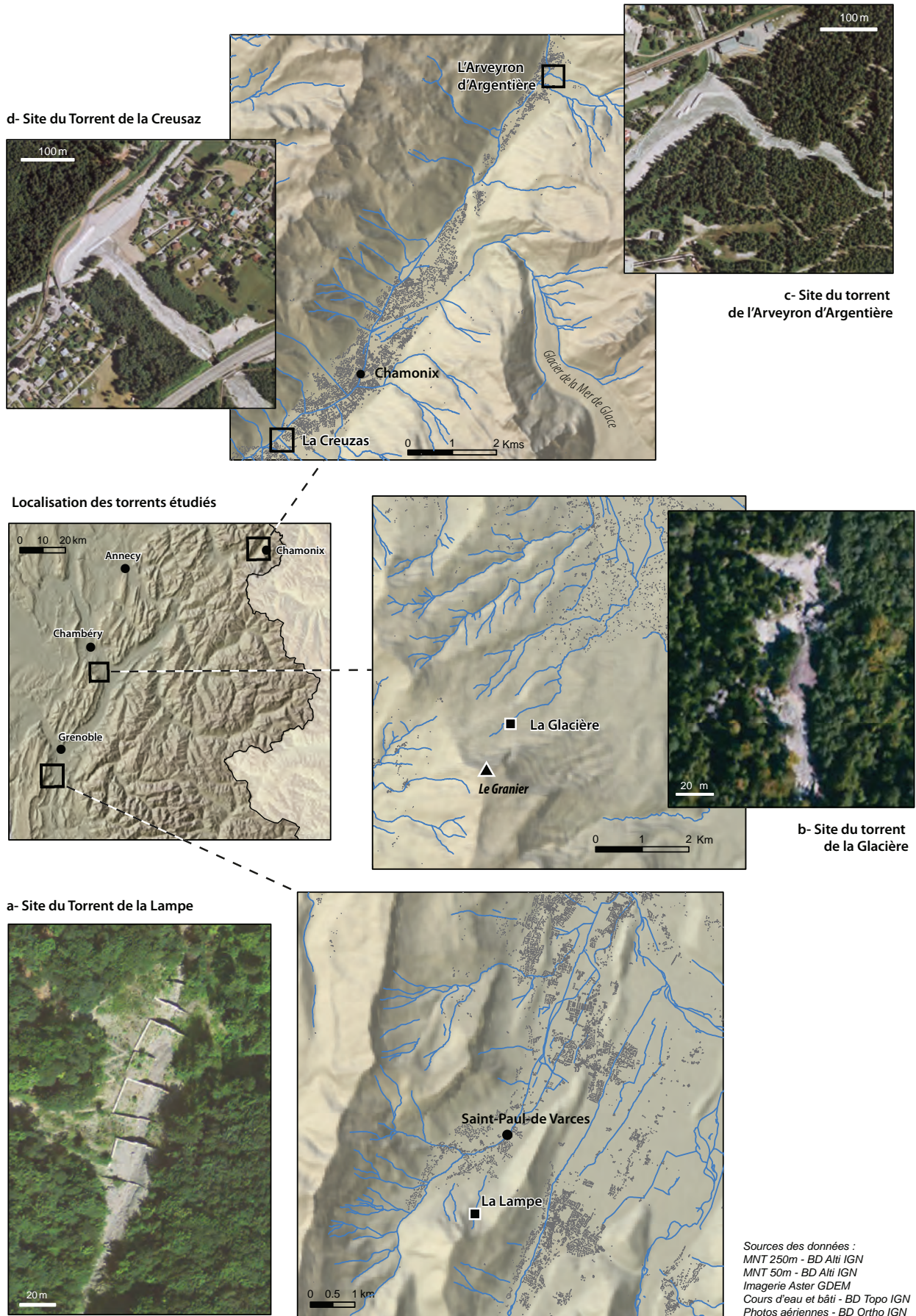


Figure 1 - Localisation des sites suivis : a) le torrent de la Lampe ; b) le torrent de la Glacière ; c) l'Arveyron d'Argentière ; d) le torrent de la Creusaz.

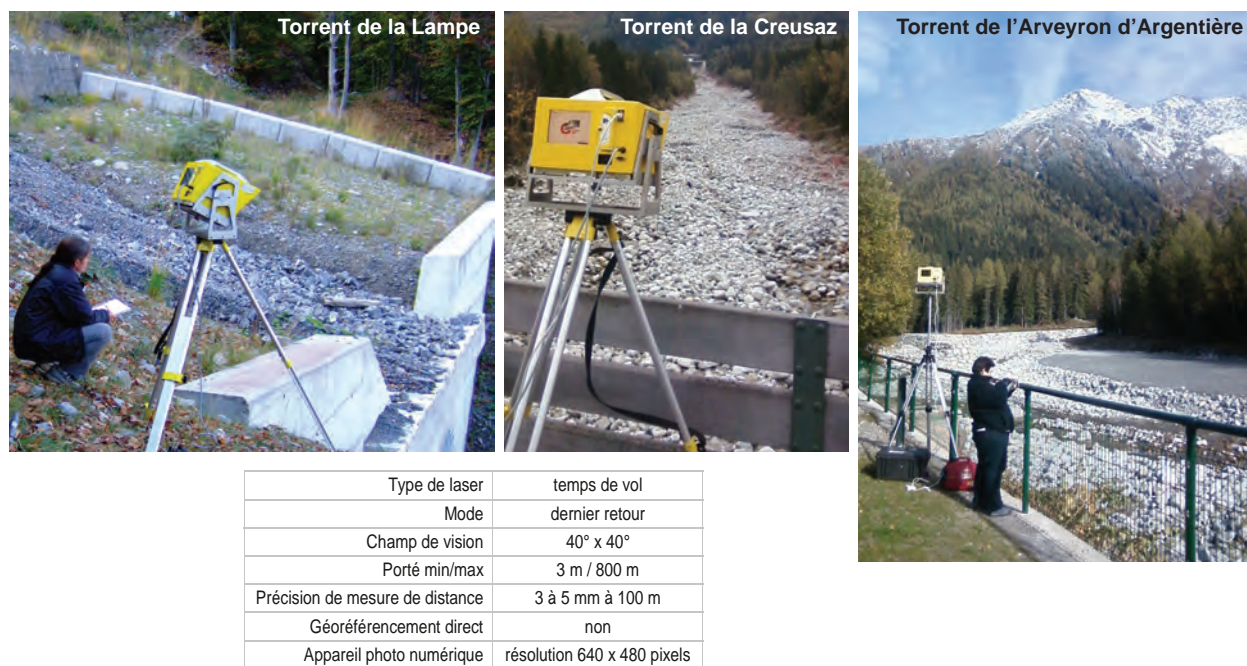


Figure 2 - Acquisition des données et caractéristiques techniques du laser terrestre Ilris3D-Optech utilisé.

plient les masques – et donc les faces cachées – et les angles fuyants (phénomènes de flambage et de points « mixtes »), augmentent les difficultés dans l'assemblage des nuages de points. Le type d'erreur le plus complexe à traiter est lié au faisceau laser (Figure 6) qui, en plus d'être de dimension variable avec la distance, produit en milieu rugueux des mesures erronées. En effet, lorsqu'il atteint une arête, une partie du faisceau la mesure effectivement, mais une autre mesure une surface plus éloignée ; il se produit alors un retour mixte qui crée un point inexistant, situé quelque part entre les deux. Le cumul de ces points produit un voile à l'arrière de l'arête. Et plus la visée est oblique, plus les points « mixtes » sont incohérents avec la réalité de terrain (Lichti *et al.* 2005). Il est très difficile de filtrer ces points de manière automatique ; il s'agit alors de les éliminer « manuellement » une fois les scènes assemblées, ce qui est aisé pour les gros blocs ou les structures artificielles mais bien plus difficile à identifier sur des objets de l'ordre de quelques centimètres (cas de la charge de fond). Une première solution apportée pour faciliter l'assemblage a été d'augmenter encore le nombre de stations sur le terrain. Cependant, en dépit d'un assemblage correct, il s'est avéré que les nuages de points étaient en fait difficilement comparables entre eux. En effet, des distorsions ont été observées lors des premiers tests de superposition. Ce phénomène est probablement lié à la très faible densité de points en certains endroits et à des scènes acquises selon des points de vue trop différents (les nuages de points ne présentaient alors pas suffisamment de structures communes).

3 - Consolidation des assemblages et géoréférencement

Pour remédier aux problèmes de superposition évoqués ci-dessus, les nuages de points ont été consolidés par le géoréférencement de points fixes (ouvrages) qui permettent d'ajuster l'assemblage et le calage des scènes en procédant à un « *best-fit* » avec « points contraints ». Ce géoréférencement (Lambert III sud) est réalisé à l'aide d'une station totale couplée à un GPS différentiel. Plusieurs de ces points sont intégrés aux nuages de points par des mesures complémentaires au scanner laser à plus haute résolution sur des cibles en damier noir et blanc ou des objets sphériques préalablement disposés (Figure 3c).

4 - Le passage du MNS au MNT

Une autre contrainte est celle liée à la végétation présente dans les parties les moins dynamiques du chenal qui constitue un bruit important dans le nuage de points qui perturbe la procédure de maillage (Figure 3D). Or leur suppression n'est pas réalisable par filtrage automatique ; le passage du modèle numérique d'élévation au MNT passe alors par un traitement « manuel », moins compliqué pour les arbustes, grâce à leur houp-pier, que pour les herbacées qui doivent être distinguées des cailloux. Conjointement, sont filtrés les panaches liés aux effets d'arêtes sur les blocs les plus grossiers et sur le haut des ouvrages. Les nuages de points 3D résultants (Figures 3c et 5c) sont caractérisés par une

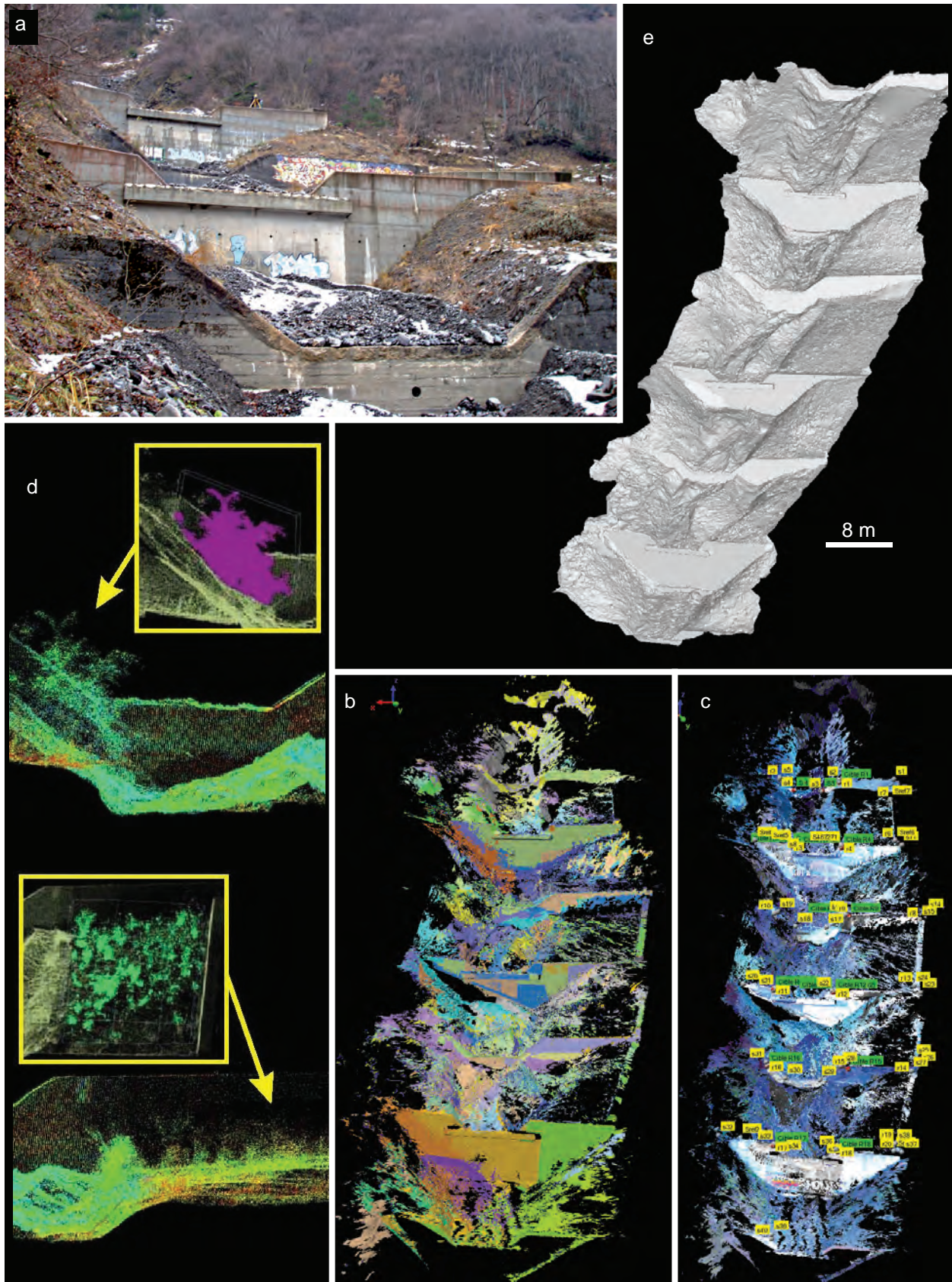


Figure 3 - Traitements du nuage de points pour le passage au MNT de la Lampe (2005) :

- a) vue d'une partie du site ;
- b) nombre de nuages de points (un par couleur) pour une campagne de mesure ;
- c) nuages de points assemblés et géoréférencement ;
- d) bruit lié à la végétation ;
- e) maillage 3D.



Figure 4 - Traitements du nuage de points pour le passage au MNT de la Glacière (2009) : a) vue d'une partie du site ; b) maillage 3D.

densité variable de points liée aux mesures (orientation des faces des objets par rapport aux visées, dégradation de la densité avec l'éloignement par rapport à l'émetteur ; Figure 6), aux zones de recouvrement entre les nuages de points et au nettoyage des artefacts (végétation principalement).

5 - Le maillage 3D

Les nuages de points sont maillés par triangulation Delaunay 3D de manière à garder le détail des formes et à permettre la comparaison des MNT entre eux. Ceci a nécessité plusieurs étapes :

- mailler grossièrement le nuage de points 3D (maille de l'ordre de 1 à 2 m) pour obtenir une surface 3D s'approchant de la surface des points 3D en ayant le moins de trous possible dans le maillage ;
- affiner le maillage par « erreur de corde 3D » spécifique au logiciel 3DReshaper (on impose à la surface précédente une déformation locale de manière à ce qu'elle s'approche des points mesurés ; l'erreur de corde est fixée par la taille des formes intra-chenal que l'on souhaite pouvoir différencier, soit environ 10-20 cm). L'affinage du maillage se fait en utilisant les points du nuage et non par interpolation de nouveaux points avec une réorganisation locale des triangles du maillage ;
- homogénéiser les maillages entre eux pour faci-

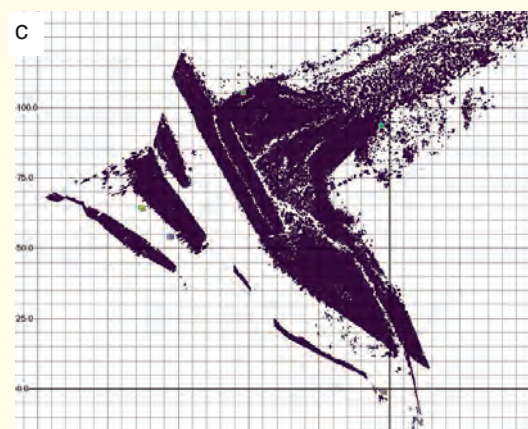
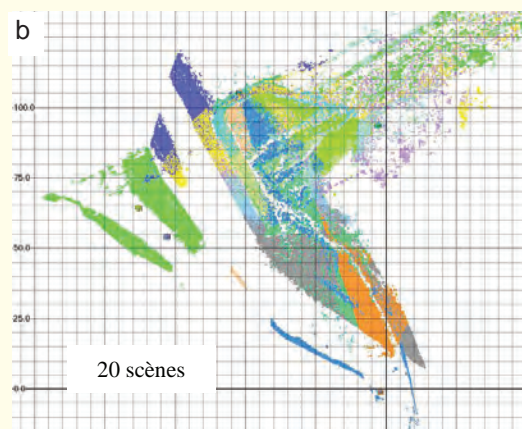
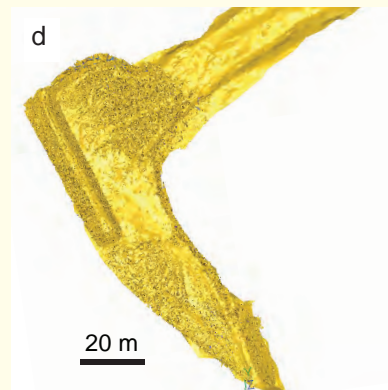
liter la comparaison des MNT. En effet, les étapes précédentes de maillage permettent d'obtenir des TIN (Triangulated Irregular Network) dont la taille des triangles varie en fonction de la densité des nuages de points. Il s'agit ici d'interpoler de nouveaux points sur la surface 3D précédemment établie pour avoir des mailles plus régulières (fonction de 3DReshaper). Cette densification du maillage est rendue nécessaire car une maille à peu près homogène doit être conservée pour permettre une bonne corrélation des surfaces dans l'étape de comparaison entre les différentes années.

A l'issue de ces traitements (Figures 3 e, 4 b et 5 d), la résolution obtenue pour les MNT est de l'ordre de 20 cm. Cette maille peut paraître relativement grossière et peut sans doute être réduite mais compte tenu de la nature des nuages de points obtenus après traitements (zones de faibles densités de points voire lacunes) et du détail de précision retenu au départ, le choix a été fait de rester à ce niveau de résolution.

6 - La comparaison des MNT

Plusieurs méthodes de comparaison des surfaces sont envisageables. Il est possible de comparer les données selon l'axe des z ou bien selon un vecteur défini par l'utilisateur. Ce dernier cas est adapté à des objets qui se déplacent dans l'espace entre les années

Torrent de la Creusaz



Torrent de l'Arveyron d'Argentière

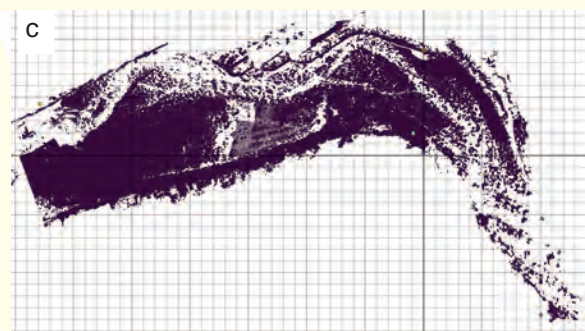
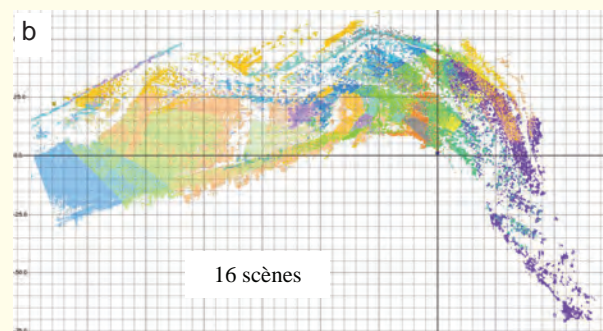
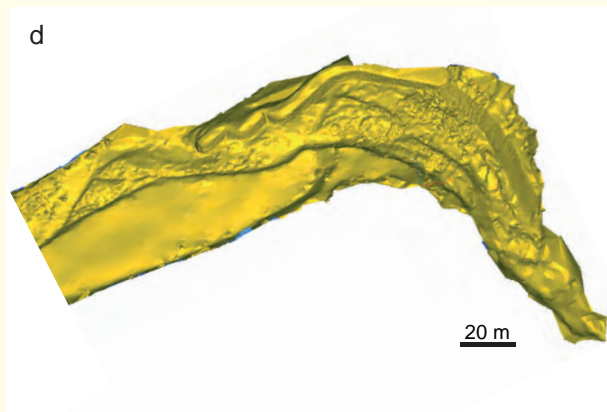
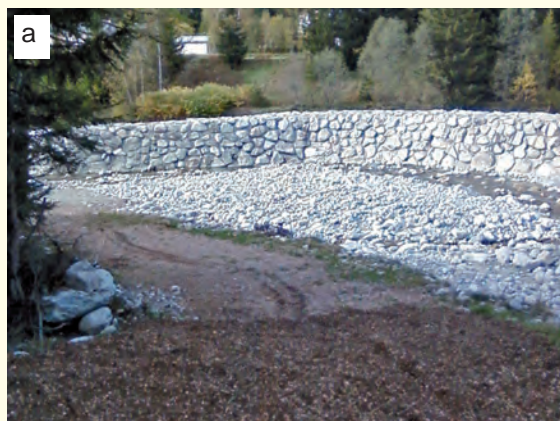


Figure 5 - Traitements du nuage de points pour le passage aux MNT des affluents de l'Arve (2010) : a) vue d'une partie des sites ; b) nombre de nuages de points (un par couleur) pour la campagne de mesures ; c) nuages de points assemblés ; d) maillage 3D.

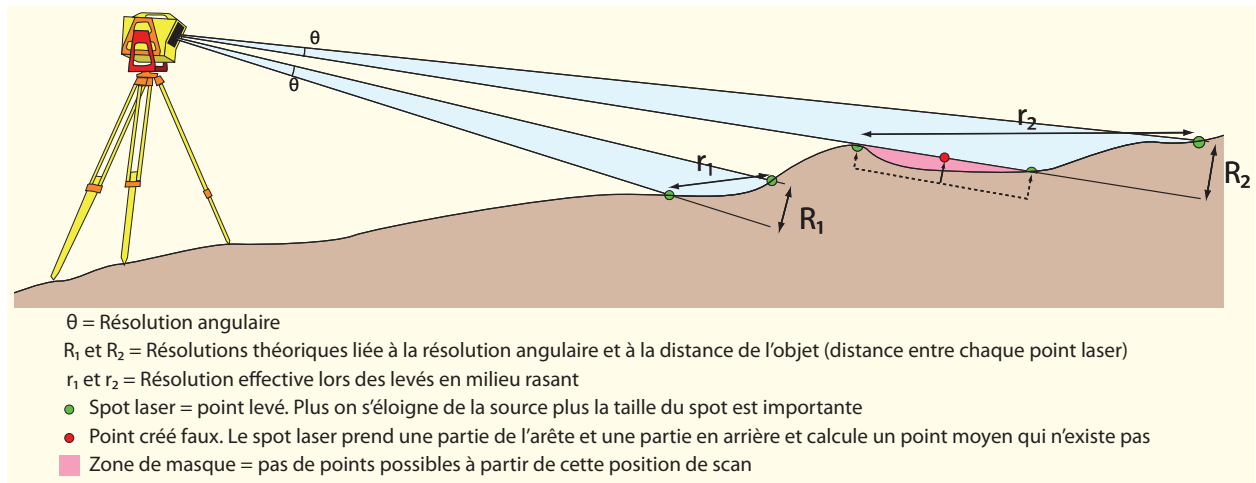


Figure 6 - Difficultés liées à l'acquisition (visées rasantes, masques et angles fuyants).

d'observation mais qui nécessitent de pouvoir être identifiés. Dans le cas d'un torrent, il est préférable de comparer selon l'axe des altitudes car d'une part les formes (par exemple les blocs) ne sont pas identifiables entre les différentes dates, et, d'autre part, c'est plus la variation de volume (accumulation/érosion) en un point que le mouvement de chaque élément qui est recherchée. Comme les MNT sont tous dans le même référentiel après calage au GPS et à la station totale,

l'étape de comparaison se limite à superposer les différentes dates et à inspecter les variations positives ou négatives des surfaces 3D entre elles (Figure 6). Compte tenu de la résolution des maillages mais plus encore des artefacts non filtrables, les comparaisons ne font apparaître que les zones où le changement est supérieur à une certaine épaisseur (de l'ordre de 15 cm en positif ou négatif, ce qui correspond au niveau de précision initialement recherché).

III - RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES, ENSEIGNEMENTS ET DÉVELOPPEMENTS

La spatialisation des évolutions entre les campagnes de mesures successives, réalisées pour l'instant seulement sur le torrent de la Lampe, permet une visualisation très précise de la dynamique sédimentaire (Figure 7 a et b). Entre 2005 et 2006 les dépôts dans le seuil 1 s'érodent, par endroit jusqu'à 2 m. Les 3 seuils de l'aval connaissent une accumulation (jusqu'à 3 m), de forme de plus en plus conique, jusqu'au seuil 5 où la charge est bloquée et le transit interrompu. Entre 2006 et 2007, on observe un dépôt dans le seuil 1 et une remobilisation dans le seuil 4 au profit du 5. Enfin entre 2007 et 2008, les évolutions sont beaucoup plus hétérogènes et concentrées sur les bourrelets latéraux. Ces résultats montrent que les casiers jouent en plein leur rôle de protection en stoppant ou en freinant la propagation de la charge sédimentaire. Seul le seuil 2 n'enregistre pas d'érosion ou d'accumulation. La charge ne fait en ce lieu que transiter. Le travail permet ensuite la quantification des surfaces et surtout des volumes d'érosion et de dépôt. Ainsi, par exemple entre 2005 et 2006 (Figure 7 c), le seuil 1 a connu une érosion de 230 m³ et une accumulation de 102 m³ (soit un volume net de +128 m³), et le seuil 5 une érosion de 152 m³ et 5 m³ d'accumulation (soit +147 m³). La faible fréquence des campagnes de mesures (une par an) pose légitimement

la question du passage direct d'une lame sédimentaire en un ou quelques événements intra annuels. Mais des observations à l'aval du site permettent de rejeter cette éventualité : aucun dépôt n'est visible ni dans la plage de dépôts située à quelques centaines de mètres, ni dans le chenal incisé dans le cône de déjection, ni même dans le seuil 6 (hors MNT). Les ouvrages de l'amont sont encore en phase de remplissage, entraînant une rupture du transit, jusqu'à un certain point qu'il sera intéressant d'identifier.

Ces premiers résultats montrent l'intérêt du scanner laser, jusqu'alors plus souvent utilisé pour la simple reconstitution numérique que pour l'étude d'objets dynamiques. La rapidité d'acquisition (rapportée au nombre de points) et la précision obtenue dans les MNT permettent des approches diachroniques et quantitatives indispensables pour la connaissance des processus et des évolutions géomorphologiques. En jouant sur la fréquence et/ou la date des campagnes, et en couplant avec des méthodes classiques de suivi de la charge torrentielle, des informations complémentaires peuvent être obtenues sur la dynamique (vitesse de déplacement, durée de stockage, quantification des volumes, etc.) et pour la gestion (suivi du remplissage des ouvrages, programmation des curages, mise en

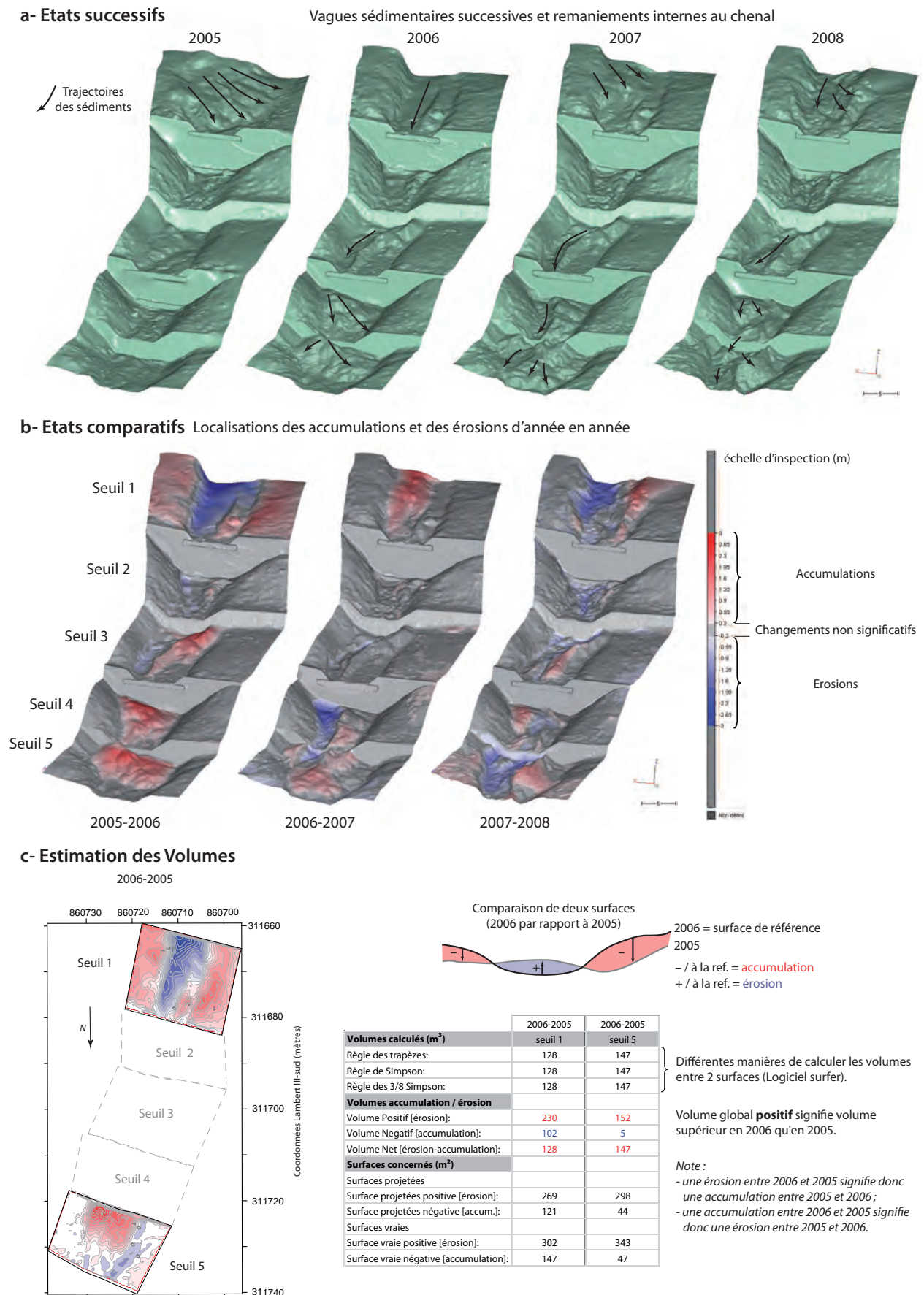


Figure 7 - Comparaisons diachroniques sur le site du torrent de la Lampe entre 2005, 2006, 2007 et 2008 : a) états successifs ; b) états comparatifs ; c) estimation des volumes.

place du profil d'équilibre après les interventions, etc) de la charge.

Mais ces expérimentations mettent aussi en exergue les difficultés induites par les conditions de levés en milieu torrentiel qui ne permettent pas toujours l'utilisation optimale d'appareils à haute technologie et qui nécessitent un important traitement. Les données levées sont sujettes à des erreurs inhérentes au système de mesure mais aussi amplifiées par les conditions de terrain (emprise spatiale linéaire, laser dans l'objet, nombre de nuage de points important, visées très obliques, rugosité forte et variable, absence de points liés aux nombreux masques voire, dans certains cas, à la présence de l'eau). La principale difficulté est liée à l'angle d'incidence de la visée laser (presque perpendiculaire dans les usages traditionnels des lasers terrestres) qui a pour effet de produire des déformations. Comme la taille de l'empreinte laser est variable avec

la distance d'acquisition, l'erreur induite par ces angles incidents est proportionnelle à la distance d'acquisition et inversement proportionnelle à la tangente de cet angle incident (Lichti *et al.* 2005). Il convient d'être vigilant face aux artefacts produits dans l'acquisition des données pour éviter les erreurs de traitements ou au moins les minimiser.

Des solutions raisonnablement applicables dans la collecte des données puis dans les différentes étapes de traitement ont été mises en œuvre ou sont encore testées pour affiner le protocole d'acquisition (réflexion sur la résolution d'acquisition sur le terrain, utilisation de matériel plus adapté : champ de vision plus grand, surélévation du scanner pour limiter l'effet rasant des visées) et améliorer les algorithmes de traitements et l'analyse (végétation, arêtes, réflexion sur les intervalles de changements non significatifs lors de la comparaison des MNT).

BIBLIOGRAPHIE

- ARATTANO M., 2003. Monitoring the presence of the debris-flow front an dits velocity through ground vibration detectors. In R. Dieter and C.I. Chen (editors), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, And Assessment* (conference proceedings). Millpress, Davos, 719-730
- ASTRADE L., JACOB-ROUSSEAU N., BRAVARD J.-P., ALLIGNOL F., SIMAC L., sous presse. Detailed chronology of mid-altitude fluvial system response to changing climate and societies at the end of the Little Ice Age (South-Western Alps and Cévennes, France). *Geomorphology*.
- BOWEN Z.H., WALTERMIRE R.G., 2002. Evaluation of Light Detection and Ranging (LiDAR) for measuring river corridor topography. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(1): 33-41.
- BRASINGTON J., RUMSBY B.T., McVE R.A., 2000. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9): 973-990.
- BRASINGTON J., LANGHAM J., RUMSBY B., 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53, 3-4, 299-316.
- BRUNSDEN D., 1993. Mass movement, the research frontier and beyond: a geomorphological approach. *Geomorphology*, 7, 1-3, 85-128.
- HAUER C., MANDLBURGER G., HABERSACK H., 2009. Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using LiDAR data as geometric input. *River Research and Applications*, 25, 1, 29-47.
- HERITAGE G., HETHERINGTON D., 2007. Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1, 66-74.
- HERITAGE G.L. MILAN D.J., 2009. Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 113, 1-2, 4-11.
- HERITAGE G.L., MILAN D.J., LARGE A.R.G., FULLER I.C., 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, 112, 3-4, 334-344.
- HOUBRECHETS G., PETIT F., 2003. Utilisation des microscopies métallurgiques comme traceur de la sédimentation dans les plaines alluviales des rivières ardennaises. Actes du colloque L'érosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement, Clermont Ferrand, 91-96.
- JONES A.F., BREWER P.A., JOHNSTONE E., MACKLIN M.G., 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 10, 1574-1592.
- KONDOLF G.M., LARSON M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. *Aquatic Conservation*, 5, 109-126.
- LANDON N., 1999. L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme. Thèse de Doctorat, Université Paris IV-Sorbonne, 545 p.
- LANE N.S., RICHARDS K.S., CHANDLER J.H., 1993. Developments in photogrammetry, the geomorphological potential. *Progress in Physical Geography*, 17, 3, 306-328.
- LAVIGNE F., THOURET J.-C., 2003. Sediment transportation and deposition by rain-triggered lahars at Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Geomorphology*, 49, 1-2, 45-69
- LIÉBAULT F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de doctorat, Université Lumière, Lyon, 357 p.
- LICHTI D.D., GORDON S.J., TIPDECHO T., 2005. Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks. *JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING-ASCE*, 131, 4, 135-142.

- MILAN D.J., HERITAGE G.L., HETHERINGTON D., 2007. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 11, 1657-1674.
- MILAN D.J., HERITAGE G.L., LARGE A.R.G., FULLER I.C., 2011. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. *Geomorphology*, 125, 1, 160-171.
- MURPHY P.N.C., OGILVIE J., MENG F.R., ARP P., 2008. Stream network modelling using LiDAR and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22, 12, 1747-1754.
- NOTEBAERT B., VERSTRAETEN G., GOVERS G., POESEN J., 2009. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 217-231.
- PEIRY J.-L., 1996. La charge en suspension et la charge dissoute dans l'Isère à Grenoble : protocole de mesure et de test des données. *Rev. Géogr. Alpine*, 84-2, 103-110.
- RUMSBY B. T., BRASINGTON J., LANGHAM J. A., MCLELLAND S.J., MIDDLETON R., ROLLINSON G., 2008, Monitoring and modelling particle and reach-scale morphological change in gravel-bed rivers: Applications and challenges. *Geomorphology*, 93, 1-2, 40-54.
- SALVADOR P.-G., 1991. Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère, thèse de doctorat de Géographie, Université de Lyon 3, 498 p.
- SCHEIDL C., RICKENMANN D., CHIARI M., 2008. The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 5, 1113-1127.
- SPIEKER R., ERGENZINGER P. (1990). New developments in measuring bed load by the magnetic tracer technique. Erosion, Transport and Deposition Processes, Proceedings of the Jerusalem Workshop, march-april 1987, IAHS.
- VEYRAT-CHARVILLON S., MEMIER M., 2006. The use of archive data by stereophotogrammetry with a topographic methodology of debris-flow torrent measurements: calculation of channel sediment states and partial sediment budget on Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 201-219.
- WHEATON J.M., BRASINGTON J., DARBY S.E., SEAR D.A., 2010, Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 2, 136-156.

TOPOGRAPHIE, REPRÉSENTATION ET ANALYSE MORPHOLOGIQUE 3D DE DRAINS, DE CONDUITS ET DE PAROIS DU KARST

TOPOGRAPHY, 3D REPRESENTATION AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF DRAINS, CONDUITS AND WALLS OF KARST

STÉPHANE JAILLET¹, BENJAMIN SADIER^{1, 2}, JUDICAËL ARNAUD³, MARC AZÉMA⁴, ELISA BOCHE^{1, 5},
DIDIER CAILHOL¹, MARCO FILIPPONI⁶, PATRICK LE ROUX⁷, ERIC VARREL⁸

¹ Laboratoire Edytem, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

² Cabinet Perazio, 137 rue du Mayoussard, 38430 Moirans, France.

³ Comité départemental de Spéléologie de l'Ardèche, les Blaches, 07120 Chazouan, France.

⁴ Laboratoire TRACES, Université de Toulouse 2 le Mirail /CNRS,
Maison de la Recherche Bât 26, 5, 31058 Toulouse Cedex 9, France.

⁵ Centre national de la Préhistoire, 38 rue du 26^e Régiment d'Infanterie, 24000 Périgueux, France.

⁶ GEOLEP, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Station 18, CH 1015, Lausanne, Suisse.

⁷ Groupe de Recherches Biospéléologiques, 13 impasse Le Roux, 29000 Quimper, France.

⁸ ATM3D Rhône-Alpes, Route de Saint Sylvestre, Le trollet, 01150 Sainte-Julie, France.

RÉSUMÉ

L'analyse morphologique des drains, des conduits et des parois du karst passe traditionnellement par des représentations graphiques 2D (plan et coupes) qui ne rendent pas toujours compte de la complexité géométrique de cet objet éminemment 3D. L'apparition et la démocratisation d'outils informatiques, de traitement et de rendu 3D permettent aujourd'hui de revisiter cette analyse morphologique. Les relevés souterrains filaires (coordonnées polaires successives) sont désormais traités en squelette 3D. De même les relevés lasergrammétriques permettent maintenant de générer des modèles denses de portion de conduits ou de parois. Après avoir présenté les différents modes de discrétisation de l'espace souterrain, nous proposons trois exemples d'application à trois échelles différentes : (i) à l'échelle du massif, avec le réseau de Foussoubie où un modèle à maille décimétrique permet de rendre compte de la géométrie des drains ; (ii) à l'échelle d'un conduit avec le réseau de Midroï où un relevé laser dense à échelle pluri-centimétrique permet de reconstituer les étapes du remplissage sédimentaire et enfin (iii) à l'échelle du panneau avec le réseau de Baume Latrône où un modèle dense à échelle millimétrique permet d'analyser la géométrie des vagues d'érosion mis en place en régime noyé.

MOTS-CLÉS : LIDAR TERRESTRE, MODÈLE 3D, KARST, ENDOKARST, FOUSSOUBIE, MIDROÏ, BAUME LATRÔNE.

ABSTRACT

Morphological analysis of drains, conduits and walls of karst traditionally uses 2D graphical representations (plan and sections) that do not always reflect the complex geometry of the object in 3D. The development and availability of tools, processing and 3D rendering shows that it is now possible to revisit this type of morphological analysis. Topographic wireline surveys (coordinate successive polar) are now treated in 3D. Similarly, scanned dense-point clouds (terrestrial lidar) now allow us to generate models of portions of drains or walls. After presenting the different modes of underground space representation, we offer three examples of application to three different scales: (i) at the system scale, with the network model "Foussoubie", which can account for the geometry of the drains; (ii) at the conduit scale, with the high resolution TIN model of "Midroï cave", which allows us to reconstruct the stages of infilling; and finally (iii) at the wall scale, using data from "Baume Latrone cave", where a dense millimetre-scale model was used to analyze the geometry of erosional scallops generated in the phreatic zone.

KEYWORDS: TERRESTRIAL LIDAR, 3D MODEL, KARST, UNDERGROUND KARST, FOUSSOUBIE, MIDROÏ, BAUME LATRÔNE.

INTRODUCTION

Par l'organisation de ses formes comme par la géométrie de ses conduits, le karst est par nature un objet éminemment 3D. Dès le 19^e siècle, les premiers explorateurs du monde souterrain qui ont cherché à rendre compte, notamment par le dessin, de cette géométrie ont eu recours au plan, à la coupe et aux profils de conduits (Shaw, 1992 ; Gauchon, 1997). Cependant, si ce mode de représentation, toujours d'actualité, permet en effet de représenter une partie importante des informations contenu dans le karst, elle oblige à un effort intellectuel difficile dans la perception de la troisième dimension.

C'est pourquoi très tôt, certains ont eu recours à la maquette pour représenter cette complexité des conduits, maquette qu'ils pouvaient même enrichir au fur et à mesure du développement des recherches spéléologiques dans tel ou tel réseaux.

Le premier qui a représenté le karst en 3D fut peut être Stanislas Meunier (1902). Avec de l'eau acide, il avait réalisé des avens dans des blocs de calcaire. Martel cite ce travail dans sa « *Spéléologie au XX^{ème} siècle* ». Martel ensuite, pour l'« *Exposition des Grottes* » organisée à la gare de Paris-Quai d'Orsay par la Compagnie des Chemins-de-Fer du Paris-Orléans-Midi, a présenté des maquettes en relief, réalisées en plâtre (Daniel André, communication personnelle).

Plus tard, une méthode de présentation des volumes souterrains par les anaglyphes est proposée et au moins deux éditions seront publiées, toujours sur des grottes touristiques (Padirac et les merveilles souterraines de la France, à la fin des années 1930). Bien que limités à des photographies de salles et de concrétions avec un mode de restitution du relief basé sur l'utilisation de lunette rouge et bleu, les anaglyphes de grottes constituent une méthode précoce de représentation du volume en 3D (Photo 1). Elle sera suivie plus tard par des modes de représentation basée sur la stéréoscopie.



Photo 1 - Les deux éditions des anaglyphes de grotte à la fin des années 1930. Un premier mode de représentation des volumes souterrains en relief, par l'utilisation de lunettes bleu et rouge et de couples de photographies.

En 1942, J. Harlen Bretz publie un volumineux article dans lequel il décrit un certain nombre de formes de l'endokarst. A plusieurs reprises, il a recours au bloc-diagramme ou au dessin en perspective pour représenter à l'échelle de drains ou de portions de conduits, l'organisation des différents objets et leur relation avec l'encaissant calcaire.

Pierre Chevalier (1944 a) a réalisé une maquette, en fil de fer, à l'échelle du 1/1000 de la Dent de Crolles en Chartreuse (14 km de développement à ce moment là, plus de 50 km aujourd'hui), présenté à la Société de Géographie le 6 mai 1944 (ainsi qu'en 1952 au premier stage de formation de cadre de spéléologie à Perquelin, Photo 2). Cette maquette est le support de ses observations et constitue un élément important des idées qu'il développe alors quant à la spéléogénèse des conduits du karst (Chevalier, 1944 b). Dans un esprit similaire, les « Drabons et Chieures de Méaudre » ont réalisé en 1988 une maquette en plexiglas à 1/1000 du Trou qui Souffle (Lismonde, 1991). De même, le Groupe Spéléo Valentinois (Garnier, 2008) a réalisé une maquette en 3D (à base de fil de cuivre) de la grotte de la Luire (44 km de développement), toujours visible sur le site. Accompagné de schémas en perspective (Garnier, 2008), elle constitue un support à la réflexion sur le fonctionnement hydrologique de ce très grand réseau du Vercors.



Photo 2 - Pierre Chevalier (à gauche) présente la maquette du réseau souterrain de la Dent de Crolles. Séance de travail dans la cour de la maison Delarue (Archives de l'Ecole Française de Spéléologie), St-Pierre-de-Chartreuse, Isère, en 1952.

On l'aura compris à travers ces différents exemples, la réalisation de modèles analogiques, de représentation en perspective ou de maquettes 3D, sans se substituer aux topographiques classiques de cavités, constitue un complément visuel, support indéniable des réflexions géomorphologiques.

C'est dans cet esprit que se situe la présente note. Profitant conjointement des développements informatiques et métrologiques des vingt dernières années, on a vu apparaître en effet une gamme de logiciels adaptés à la visualisation 3D ainsi que des outils de mesures

laser de plus en plus rapides et performants (lidar terrestre notamment). Ces développements autorisent aujourd'hui à revisiter quelques peu l'image du monde souterrain, ceci à différentes échelles, ce que les technologies précédentes ne permettait pas.

I - UNE DISCRÉTISATION DU MONDE SOUTERRAIN

Représenter l'endokarst c'est donc, dans un premier temps, faire des plans et des coupes. C'est aussi discrétiser l'espace souterrain, c'est-à-dire adapter le mode de représentation à l'échelle de travail. C'est aussi être capable d'intégrer la troisième dimension.

1 - De la 2D à la 3D

En cartographie « classique », la dimension de l'altitude a toujours été représentée par des hachures ou des courbes de niveau. On utilise par exemple, des MNT, à maille régulière ou non, dans lesquels le z est l'expression de l'altitude. Pour autant, il ne s'agit pas véritablement de 3D, mais plutôt de 2,5D. Dans le domaine de l'endokarst, les formes sont repliées sur elles-mêmes, elles se superposent, générant une information géométrique que les représentations 2,5D (type raster) ne permettent pas de démêler. Ce type de représentation en 2D ou 2,5D s'est donc très tôt heurté à la complexité des volumes souterrains, complexité qui apparaît (i) à l'échelle de l'ensemble des drains (étalement des conduits les uns sur les autres, multiplicité des connexions, variabilité des dimensions...) mais aussi (ii) à l'échelle des formes elles-mêmes (morphologie

pariétale) ou des dépôts. Or ces formes et formations de l'endokarst constituent, quelle qu'en soit l'échelle, un support informationnel qui est au cœur des travaux de géomorphologie endokarstique notamment pour les reconstitutions paléogéographiques.

Pour autant les solutions de représentations en plan et coupes sont toujours en vigueur aujourd'hui (Figure 1) et, depuis une quinzaine d'années, le recours aux solutions informatiques a permis d'automatiser et d'accélérer un certain nombre de procédures dans le traitement et le rendu de ces données acquises en milieu souterrain. Des gammes de logiciels dédiés accélèrent la saisie des données, automatisent les calculs et proposent des solutions mathématiques aux bouclages des conduits répartissant d'autant les erreurs matérielles ou de mesure (Heller, 1983 ; Budaj et Mudrák, 2008). Cependant, l'acquisition proprement dite n'a guère changé. Les tronçons de conduits sont toujours assimilés à un squelette filiforme (Faucher et Mautref, 1991). Les stations sont acquises les unes derrière les autres (Photo 3), sous forme de coordonnées polaires (distance, direction, inclinaison), et des sections de galeries permettent de rendre compte des changements majeurs des dimensions des conduits (Figure 2). Il s'agit véritablement d'une discrétisation des volumes souterrains

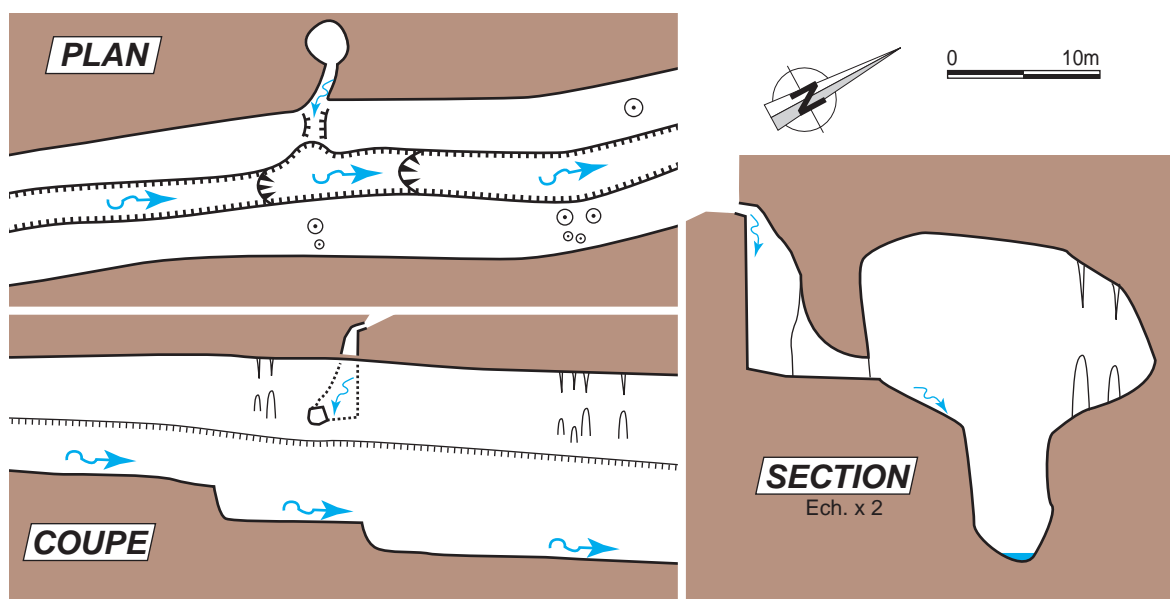
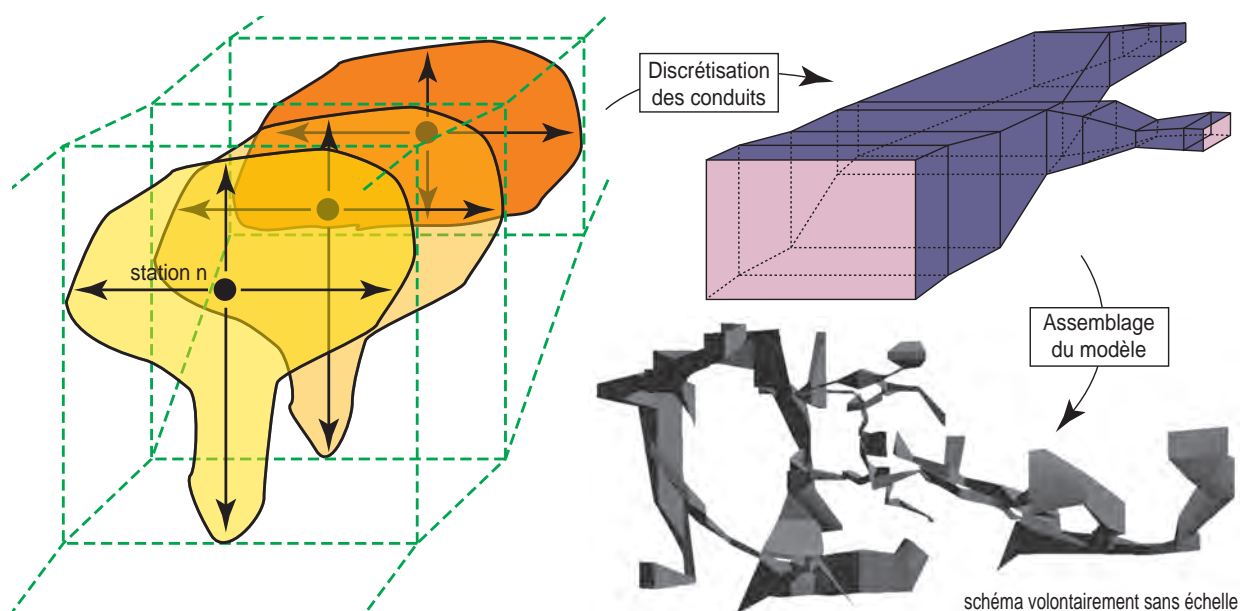


Figure 1 - Représentation topographique classique en plan coupe et section d'un drain spéléologique.



Photo 3 - Matériel de topographie classique en spéléologie : main gauche, un compas (ici couplé à un clinomètre) pour la mesure des angles (direction et pente) et main droite, un distance-mètre laser pour la mesure des longueurs. La précision angulaire est de l'ordre du demi-degré, celle des longueurs est centimétrique et la précision du positionnement des stations est décimétrique (Photo Stéphane Jaillet).

Figure 2 (ci-dessous) - Discretisation spéléologique à maille métrique à décimétrique et visualisation 3D sur des gammes de logiciels dédiés à la spéléologie (ici Visual Topo).



à des mailles fréquemment pluri-métriques et c'est la qualité des dessins levés sous terre qui, s'appuyant sur le squelette, permet de véritablement rendre compte des morphologies et des dépôts à grande échelle.

Ce type d'acquisition numérique s'avère très satisfaisante à petite échelle. En effet, la géométrie des grands réseaux spéléologiques s'appréhende à l'échelle des massifs karstiques et c'est la position géométrique des conduits eux-mêmes qui constitue l'information à traiter. En ce sens, les logiciels de traitement de données, développés au sein de la communauté spéléologique, constituent un excellent support de visualisation. Couplé à des MNT (maille à 50 m pour la BD alti en France, par exemple) et à des modèles géologiques (maille similaire pour un clic tous les millimètres sur une carte géologique), le modèle 3D des conduits peut être exploité pour des reconstitutions de paléo-niveau de base ou pour l'indentification de niveaux référen-

tiels de karstification (Martineau, 2003 ; Filipponi et Dickert, 2007 ; Filipponi *et al.*, 2008).

2 - Lasergrammétrie endokarstique

Passer à une échelle plus fine implique une discrétisation plus fine des objets investigués. Le recours aux lidars terrestres constitue alors une solution intéressante. Bien que coûteuse et impliquant le recours à un matériel conséquent, elle offre un niveau de détail inégalé sur les morphologies endokarstiques, à l'échelle du drain, comme à l'échelle de la paroi. Différents scanners, actuellement sur le marché autorisent des vitesses d'acquisition variant de 2000 à plus de 500 000 points par seconde. La procédure d'acquisition des points sur le terrain est la suivante : mise en station de l'appareil, multiplication des positions de scan, défini-



Photo 4 - Mise en œuvre d'un scanner 3D courte portée (Leica HDS 6000) avec référencement local par des sphères (Photo Stéphane Jaillet).

tion des fenêtres de scan, choix du pas angulaire déterminant la densité du nuage de points (Figure 3). Des objets géométriquement simples, placés dans la scène d'acquisition, permettent un géoréférencement au tachéomètre. Les sphères (pluricentimétriques à pluridécimétriques) sont les plus classiquement utilisées. En effet, la sphère présente l'avantage d'être une forme pure sur laquelle un ajustement mathématique sur un nuage de points donne toujours le même centroïde quel que soit la position de scan (Photo 4). Ces sphères permettent d'assembler les scènes par ajustement de leurs centres. En complément, des méthodes par best-fit (reconnaissance de formes sur le nuage de points, basée sur une minimisation des distances en 3D) sont parfois utilisées.

La qualité des mesures est variable selon les conditions du milieu (taux d'humidité de l'air, surface humide, albédo...) ; cela est réellement problématique à partir du moment où l'on travaille aux limites de l'appareil (température, distance). Le pas du levé est fonction de la problématique de recherche. Il n'est pas constant, il varie linéairement avec l'éloignement du scanner à la scène, et la multiplication des positions de scanners ne rend pas son évaluation stricte possible. L'acquisition terminée, il faut assembler, nettoyer, filtrer et trianguler le nuage de points brut. Il subsiste en effet fréquemment quelques points aberrants dans la scène liés à des problèmes de réflexion ou à des effets de bord (voile de mariée par exemple qui sont la marque des points mal positionnés, car tangents aux objets scannés). Ces points sont la plupart du temps éliminés « à la main ». De plus, la multiplication des positions de scan augmente d'autant le nombre de points et certains secteurs (portion de parois) sont ainsi doublés, triplés ou quadruplés. Un processus de filtrage permet (i) d'éliminer les points redondants (liés à ces recouvrements des scènes de scan), (ii) d'uniformiser la densité du nuage de points par ré-échantillonnage,

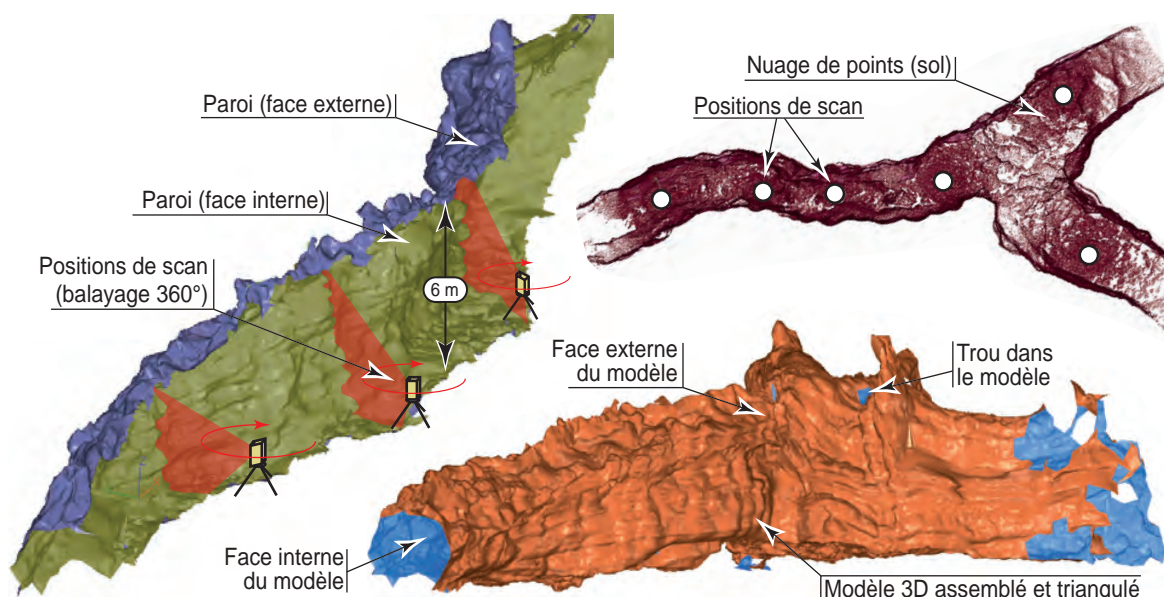


Figure 3 - Procédure de scannerisation 3D sur le terrain par différentes stations successives. Les sphères servent au référencement et à l'assemblage des scènes 3D entre elles. Des logiciels de retro-ingénierie type 3DReshaper sont utilisés pour le maillage et pour l'inspection du modèle. Ici le modèle de Midroï.

(iii) de lisser le nuage de points afin de diminuer les rugosités liées au bruit de mesure. Des fonctions de filtrage sont offertes par Polyworks© et 3DReshaper©, deux logiciels de retro-ingénierie fréquemment utilisés pour ce type de traitement.

3 - Vers des modèles RTI à haute résolution de l'endokarst

Une fois le nuage validé, la suite de l'opération consiste à mailler le nuage de points pour obtenir un modèle RTI (Réseau Triangulaire Irrégulier, TIN en anglais) (Figure 3). Cette opération permet de réduire la quantité de points acquis tout en conservant le même niveau d'information morphologique des objets. Les surfaces planes sont décrites par moins de triangles que les surfaces plus rugueuses. Cela permet également l'accélération des procédures d'affichage et de traitement. Le modèle RTI apporte surtout une information de voisinage à chaque sommet créé. Cette topologie est fondamentale pour la suite des traitements, notamment l'identification des ruptures morphologiques. Il s'agit donc de transformer le nuage de points en une

« peau numérique » continue avec création de nouveaux sommets, reliés par des arêtes. Ce faisant, on passe d'une information ponctuelle (le point) à une information surfacique (la peau) augmentant ainsi le potentiel d'information.

La constitution d'un modèle 3D en milieu souterrain résulte donc d'une véritable chaîne opératoire. Si elle est menée à l'échelle d'un réseau karstique, c'est la succession des mesures polaires et des informations inhérentes à chaque station qui constitue le squelette et qui assemblé, permet la construction du modèle à des mailles larges (métriques à décamétriques). A une échelle plus fine, le relevé lasergrammétrique et la triangulation permettent de constituer des modèles 3D fins de drain, de carrefours ou de parois à des mailles bien plus fines (millimétriques à décimétriques). Différentes échelles d'investigations impliquent différentes techniques d'acquisitions et des suites logicielles variées pour les traitements. Pour les travaux à petite échelle, citons *Toporobot*, *Visual Topo*, *DPTopo* ou *Therion*, tous libres (Heller, 1983 ; Budaj et Mudrák, 2008). Pour les maillages et l'inspection des modèles 3D, citons *3DReshaper*, *Realworks*, *Polyworks* ou *MeshLab*, ce dernier étant libre.

II - DES PROBLÉMATIQUES NÉCESSITANT LE RECOURS À LA 3D

Nous présentons ici trois exemples de travaux géomorphologiques où le recours à la 3D a permis de répondre à une question sur l'endokarst que des investigations « classiques » n'aurait pas pu (ou difficilement) résoudre sans cette opportunité. Ces exemples sont déclinés selon trois échelles : (i) celle du massif karstique avec le système de Foussoubie (Ardèche), (ii) celle du drain avec un carrefour dans le réseau de Midroï (Ardèche) et enfin (iii) celle d'une portion de paroi avec Baume Latrone (Gard).

Pour chacun de ces exemples, nous précisons les conditions d'acquisition des données sur le terrain, présentons une analyse ou un ajustement 3D réalisé sur le modèle et montrons en quoi le traitement apporte un éclairage intéressant et complémentaire aux travaux traditionnellement réalisés sur le terrain.

1 - Une application à l'échelle du massif karstique : exemple du système de Foussoubie

Vaste système karstique de la rive droite des gorges de l'Ardèche, le réseau de Foussoubie offre environ 23 kilomètres de conduits souterrains (Le Roux, 1984). C'est un système perte-émergence avec une percée hydrogéologique d'environ 7 km. Son fonctionnement est caractérisé par des crues importantes ennoyant une majeure partie des conduits. Ceux-ci

présente d'ailleurs des morphologies caractéristiques de la zone épinoyée (Photo 5) avec profil en montagnes russes et disparité spatiale des remplissages (Häuselmann, 2010). Réseau encore mal étudié du fait de ces crues et de ces mises en charges qui en limitent l'accès, Foussoubie n'en reste pas moins une cavité



Photo 5 - Le système karstique de Foussoubie (Ardèche) est un drain caractéristique de la zone épinoyée. D'un développement de plusieurs kilomètres, entre la perte (la goule) à l'amont et la zone des exutoires en rive droite de l'Ardèche, il présente une morphologie générale en montagnes russes avec une disparité spatiale des remplissages, associés aux crues et mises en charges dont il est l'objet. L'analyse 3D des 23 kilomètres du réseau montre le rôle fondamental de la structure (fracture et stratification) sur la géométrie des drains (Photo Stéphane Jaillet).

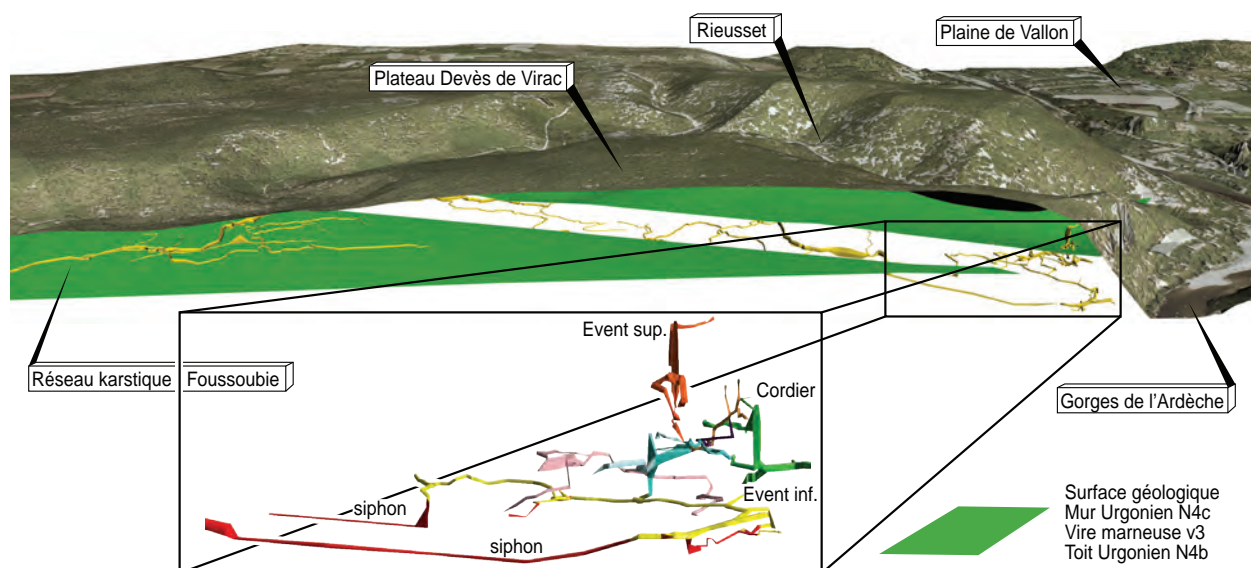


Figure 4 - Vue 3D synthétique du système de Foussoubie dans son contexte topographique, géologique et géomorphologique. L'analyse morphologique 3D permet d'identifier le rôle des contacts géologiques sur l'organisation des conduits.

passionnante. Sa topographie, débutée dans les années 1960 a été finalisée dans les années 1980 (Le Roux, 1984) sous la forme d'un document papier au 1/2 500° et de planches au 1/500°. Récemment, l'ensemble des données chiffrées acquises durant deux décennies de topographie souterraine a été saisi sous *Visual Topo* pour la production d'un modèle 3D complet de 31 960 sommets et 59 916 faces, correspondant à 2 668 visées sur le terrain et 22 855 m de développement. La longueur moyenne des visées est de 8,56 m ce qui donne une idée de la maille du modèle. Généré sous *Visual Topo*, puis exporté sous *DPTopo*, le modèle est ensuite exploité sous format *.wrml sous *MehLab*, sous *3DSMax* ou sous des logiciels internes de traitements statistiques.

Le modèle 3D a ensuite été intégré à un modèle topographique et géologique plus vaste couvrant la totalité du réseau et une partie du bassin versant d'alimentation. L'analyse morphologique de l'organisation des conduits en 3D couplée à la géométrie des plans géologiques (stratification, failles et fractures) offre une lecture intéressante du système karstique. Il est ainsi possible d'analyser comment le réseau se comporte dans la masse karstique urgonienne (Figure 4). Dans la partie amont du réseau, il se développe au-dessus de la vire marneuse v3, dans les calcaires urgoniens N4c, puis à la faveur d'une faille, il passe sous cet ensemble et se développe dans les calcaires N4b. Plus à l'aval, le réseau se complexifie au droit de la zone des exutoires et présente, sur plus d'une centaine de mètres de dénivellation, un

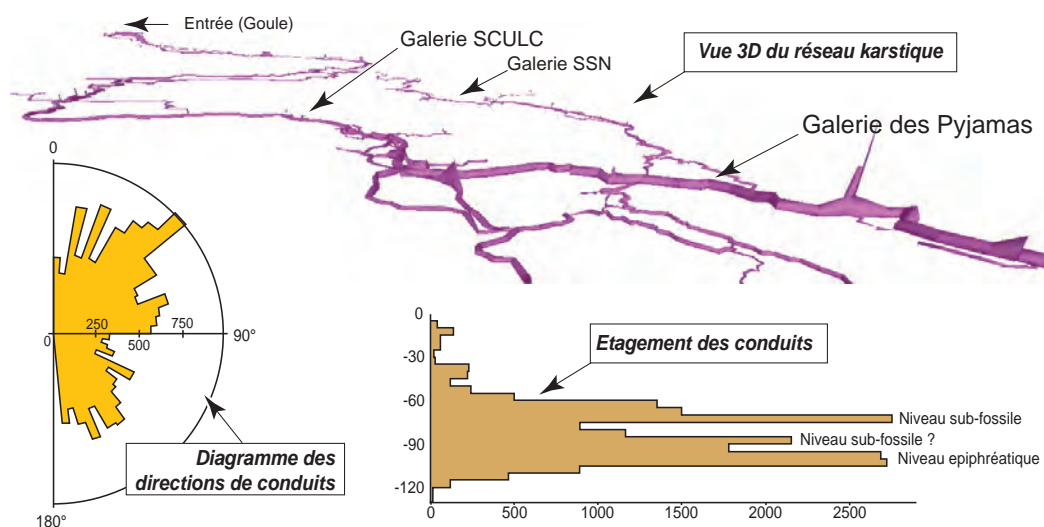
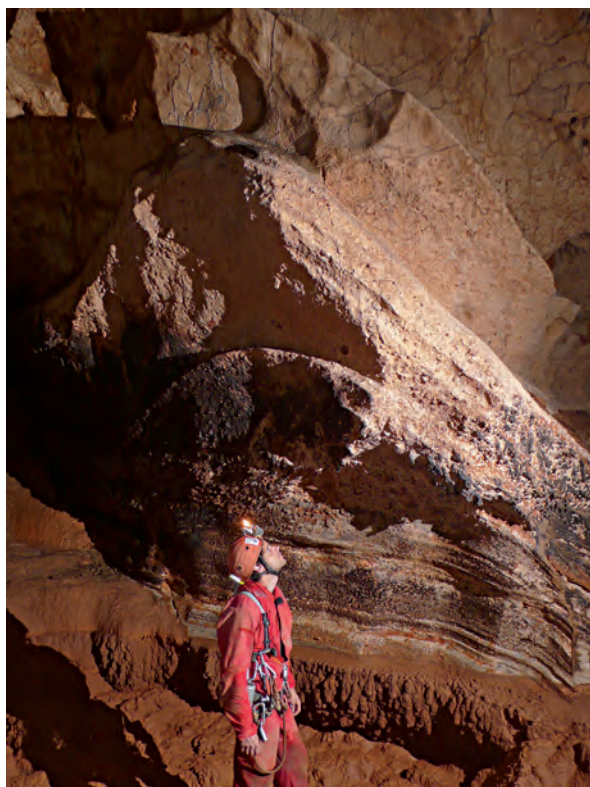


Figure 5 - Analyse 3D du système de Foussoubie. Le traitement statistique du modèle 3D permet d'identifier ici les directions majeurs des conduits (associées au contexte tectonique local) et l'étagement de ceux-ci (associé aux variations de niveau de base du réseau hydrographique dont il est affluent).

étagement de conduits, associé aux variations passées du niveau de l'Ardèche (Bigot, 2002 ; Mocochain *et al.*, 2010).

Le modèle a ensuite été traité avec *CaSuDaAn* (Cave Survey Data Analyser) développé par M. Filipponi. Cette analyse 3D des 23 kilomètres du réseau permet de dégager les directions de conduits et montre le rôle fondamental de la structure géologique (fracture et stratification) sur la géométrie des drains (Figure 5). Deux directions prédominent, l'une NE, associée aux terminaisons septentrionales du fossé d'effondrement d'Alès et l'autre conjuguée, SSE. Plus intéressant, le traitement permet une classification de l'étagement des conduits. On identifie ainsi clairement le niveau epiphréatique principale correspondant au fonctionnement en crue du réseau souterrain et présentant le plus de développement spéléologique. Le niveau des circulations pérennes n'étant pratiquement pas connu, il n'apparaît pas. Deux autres niveaux sub-fossiles sont identifiés, l'un correspondant à l'importante galerie des Pyjamas (et d'autres conduits) et l'autre moins marqué, correspondant à des conduits intermédiaires moins bien identifiés pour l'instant et qu'il conviendra de rechercher (Figure 5).

L'intérêt majeur de ce type d'analyse repose ici sur la reconnaissance et l'identification statistique et automatique de directions ou de niveaux de conduits. Replacés dans un contexte tectonique, structural et de variations des niveaux de base, ces données constituent un support pertinent à l'interprétation géologique et géomorphologique de la genèse et de l'évolution du système. En outre, ce type d'analyse impose et permet à la fois l'étude de la totalité de l'objet karstique investigué, validant d'autant les résultats, tout en accélérant les traitements.



2 - Une application à l'échelle du drain : exemple du drain de Midroï

Passer à une échelle plus fine impose un changement de technique dans l'acquisition des données de terrain. Pour une analyse à cette échelle, c'est-à-dire celle d'un drain, nous avons fait le choix de travailler sur le site du carrefour à l'aval du siphon de Midroï. Le système karstique Rochas-Midroï-Guigonne est un réseau majeur de la rive gauche de l'Ardèche (Drouin, 1993), présentant un développement total de 7950 m pour une dénivellation de 215 m. Dans la partie épi-noyée de Midroï, proche du niveau de base, on observe des morphologies éloquentes d'une genèse paragénetique (Photo 6). Ce processus, associant de manière synchrone aggradation sédimentaire endokarstique et corrosion de la voûte est caractéristique d'un écoulement en régime noyé (Renault, 1970), plutôt en période de remontée de niveau de base. Les banquettes limites de remplissages constituent une forme qui subsiste sur les parois du drain après la vidange du remplissage et leur étude permet de reconstituer les phases de mise en place du drain.

Il semblait donc fécond de chercher à reconstituer cette aggradation sédimentaire, en 3D, sur une portion de ce drain. De premières observations géomorphologiques menées sur le site (Bes *et al.*, 2007) avaient montré l'intérêt du secteur pour ce type de reconstitution et une recherche similaire (Jaillet *et al.*, 2010), entreprise sur les Salles Rouges de l'aven d'Orgnac a déjà permis de reconstituer ce type de séquence. L'intérêt est ici d'étudier le phénomène à une échelle plus fine, sur un carrefour et avec une multiplication des banquettes étagées.

Pour cela, un nuage de points dense a été relevé sur le terrain avec un lidar Leica HDS 6000. Six positions de scan ont été réalisées et ont permis d'obtenir un nuage de plus de 30 millions de points assemblés sous *Cyclone*. Le nuage a été ensuite triangulé sous *3DReshaper* puis réduit afin d'obtenir un modèle de 251 725 sommets et 499 919 faces (Figure 3). La taille générale du modèle peut être approchée par la diagonale de la plus petite boîte englobante, ici 34,4 m. La surface du modèle est de 790 m². Quelques trous ont été bouchés ponctuellement. La suite du traitement consiste à identifier sur le modèle 3D les discontinuités topographiques des banquettes. Un traitement semi automatique sur *3DReshaper* permet de générer une cartographie 3D de la courbure moyenne et d'identifier plus facilement ces ruptures. Les polygones sont alors digitalisés à l'écran sur chacune des parois du modèle. Sur ce carrefour les groupes de polygones sont ensuite assemblés par trio (trois parois) selon un choix réalisé par l'opérateur. Chaque ensemble de polygones est

Photo 6 - Banquettes-limites étagées et très inclinées dans les conduits fossiles du réseau de Midroï, Ardèche (Photo Gérard Cazes).

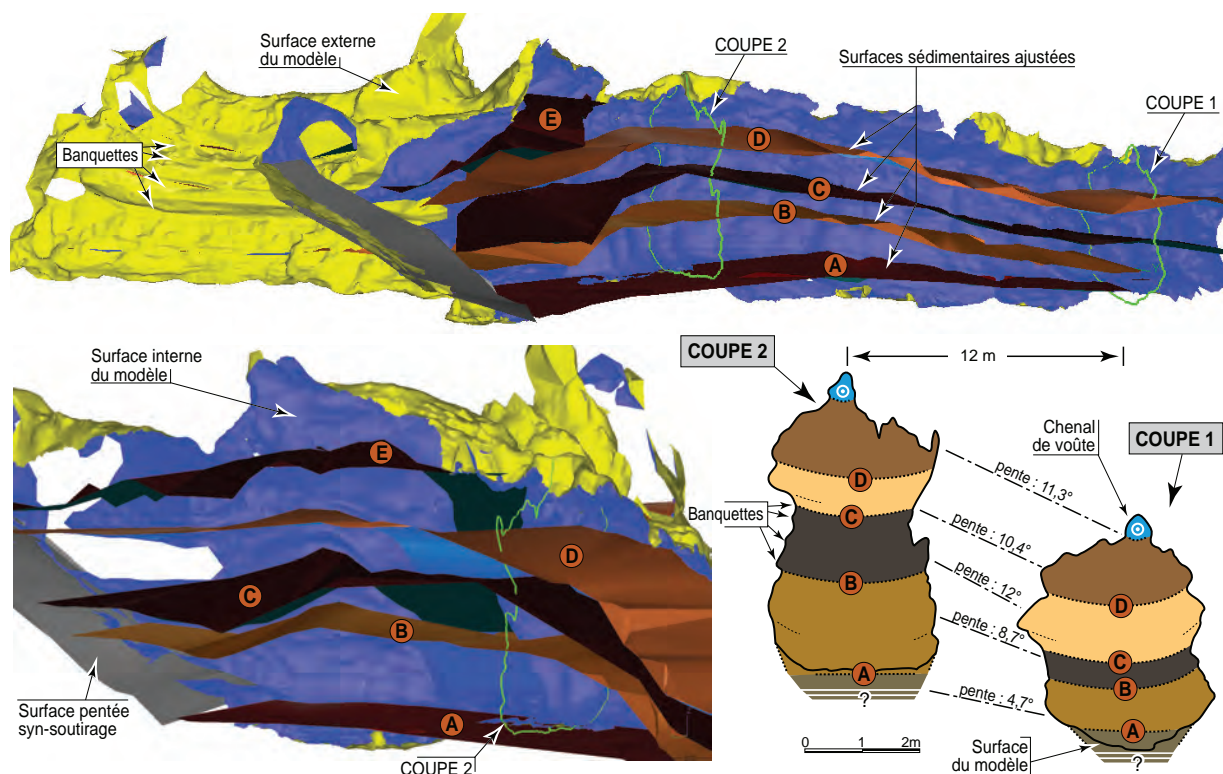


Figure 6 - Ajustement 3D de banquettes limites de remplissage sur le drain de Midroï. Noter la succession aggradante des banquettes et l'augmentation de la pente au cours de cette évolution ascendante. Noter en outre la déconnexion, en fin d'évolution du conduit principal, de la dernière surface de remplissage présente uniquement dans les deux autres branches du carrefour.

alors maillé et restitué une surface gauche correspondant à une étape de l'aggradation sédimentaire.

Cinq surfaces (numérotée de A à E) ont ainsi pu être générées (Figure 6). Etagées du bas vers le haut, elles constituent une pile morphologique correspondant à la pile sédimentaire aujourd'hui évidée et disparue. Plusieurs banquettes intermédiaires ont pu être reconnues mais elles sont trop discontinues pour constituer un support pertinent à ce type d'ajustement. Des coupes sont automatiquement générées (Figure 6) entre lesquelles il est possible de réaliser quelques mesures fines (pente du toit de chaque phase de remplissage). L'analyse du modèle traité de Midroï fait finalement ressortir les informations suivantes : (i) dans le tronçon principal, la pente des surfaces (toit du remplissage) croît au cours du temps (4 à 12°) puis se stabilise autour de cette valeur. Cela peut être la marque d'une accommodation géométrique du remplissage, au cours de l'aggradation, à mettre en relation avec le régime des écoulements ou avec la charge sédimentaire en transit ; (ii) la dernière surface (E) est uniquement présente dans les deux autres branches du carrefour. Le tronçon principal est réduit à un chenal de voûte de fin de paragenétisme associé à des écoulements noyés indigents qui marque son abandon.

Cette première analyse 3D d'un tronçon de conduit montre qu'il est possible de proposer des reconstitutions génétiques très fines. La géométrie des surfaces

ajustées en 3D constitue ici une entrée originale dans la compréhension de la dynamique sédimentaire dans un site où justement la totalité des dépôts endokarstiques a disparu. Le dernier exemple va confirmer la richesse de ce type d'information.



Photo 7 - Panneau de coup de gouges en rive gauche du collecteur souterrain de Gournier (Vercors). Noter le caractère homométrique des formes traduisant bien une vitesse nominale de mise en place, ici en période de crue de la rivière souterraine (Photo Stéphane Jaillet).

3 - Une application à l'échelle d'un panneau : exemple d'une paroi à coup de gouges

Il s'agit ici d'analyser en détail une portion de paroi (un panneau) de la grotte de Baume Latrône où des vagues d'érosion (coups de gouges) ont été identifiés. Ces sont des formes centimétriques à métriques qui se mettent en place, par dissolution, en régime noyé ou vadose sur les parois de cavités (Photo 7). Déjà Bretz (1942) avait noté l'intérêt de ces formes souterraines pariétales pour reconnaître la direction et le sens des paléo-écoulements d'un drain fossile. Curl (1966) a mis en évidence une relation entre la longueur d'onde de ces formes et la vitesse des écoulements ayant permis leur genèse (on trouvera dans Horoi (2001) une synthèse bibliographique de ces différents travaux.). Blumberg et Curl (1974) utilisent des modèles analogiques en plâtre puis Bird *et al.* (2009) des modèles 3D de ces modèles analogiques pour déterminer les conditions hydrauliques de circulation et ensuite déduire des lois qui permettent de retrouver la vitesse des écoulements qui ont prévalu à la mise en place de ces formes.

Le site a été scanné en 3D avec un Riegl LMS 390i pour les besoins d'une étude archéologique sur les parois ornées de cette grotte (Azéma *et al.*, 2010) et il était pertinent de reprendre une portion du modèle 3D généré sous *Polyworks*, pour analyser plus en détail un panneau riche en coups de gouges et vagues d'érosion. Cette portion de modèle (11,2 m²) est constituée au départ de 274 697 sommets et 546 251 faces, modèle que nous avons réduit à 68 571 sommets et 134 244 triangles tout en conservant le même niveau d'information en terme de rugosité et de morphologie. Pour

analyser cette morphologie, nous avons réalisé un traitement semi automatique sur *3DReshaper* permettant de générer une cartographie 3D de la courbure moyenne. Ce traitement a permis d'identifier avec plus d'acuité les crêtes séparant chacune des vagues d'érosion qui ont ensuite été digitalisées par deux points (départ et arrivée). La géométrie de ces segments 3D caractérise les paramètres essentiels (longueur, pente, orientation) de la forme investiguée (Figure 7). Il a été fait 76 mesures et le Tableau 1 présente les résultats des vitesses de paléo-écoulements qui ont parcouru le conduit au moment de sa genèse. Une analyse de la totalité de drain permettrait ici de proposer des gammes de paléo-débits lors de sa genèse, paléo-débits qu'il serait fécond de comparer avec la taille du bassin d'alimentation supposé du système karstique.

L'intérêt d'une telle approche et de pouvoir multiplier rapidement les mesures et d'en restituer une analyse statistique (moyenne et écart-type) et en 3D, donnant ainsi une orientation et une pente qui n'est jamais prise en compte sur le terrain. La rapidité de l'acquisition *in situ* et le post traitement informatique limitent d'autant le temps de présence dans la cavité ce qui est important dans les cavités où les questions de conservation sont prégnantes, ce qui était le cas ici.

	Longueur projetée (m)	Longueur (m)	Pente (°)	Vitesse (m/s)	Direction (°)
Minimum	0,16	0,16	-1	0,15	324
Maximum	0,58	0,63	47	0,04	19
Moyenne	0,31	0,34	24	0,05	347
Ecart Type	0,09	0,10	10	-	11

Tableau 1 - Résultat des traitements semi-automatiques réalisés sur la paroi à coups de gouges de Baume-Latrone (76 mesures).



Figure 7 - Vue 3D d'une paroi à coup de gouges et traitement semi automatique par cartographie 3D de la courbure moyenne. Chaque coup de gouge est digitalisé par deux points (départ et arrivé) dont la géométrie permet de retrouver les paramètres essentiels (longueur, pente, orientation).

III - DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

A travers ces trois exemples, il a été possible de montrer combien le recours à la 3D peut être fécond dans l'analyse géomorphologique de l'endokarst et ceci à trois échelles différentes.

A l'échelle du massif d'abord où la discrétisation des conduits karstiques d'un grand système spéléologique (23 km), à une maille moyenne inférieure à 10 m, a permis d'obtenir un modèle 3D qu'il a été possible de replacer dans son contexte (i) topographique (surface extérieure), (ii) litho-stratigraphique (rôle du niveau marneux de la vire v3 au sein de la barre des calcaires urgoniens), (iii) tectonique (rôle des fractures dans l'orientation des drains et des failles dans les connexions entre compartiments calcaires) et (iv) géomorphologique (étagement des drains et relation avec les variations du niveau du réseau hydrographique de l'Ardèche). Certes, ce type d'analyse était déjà réalisé auparavant, mais le gain de temps dans les traitements statistiques qui suivent et la possibilité de rendu visuel sans cesse renouvelable justifient le peu de temps qu'implique la saisie des données informatiques sur des logiciels désormais courant.

A l'échelle du drain ensuite où un relevé lidar à haute densité a permis de générer un modèle dense d'un carrefour dont la genèse est associée à un processus paragenétique. L'identification sur le clone numérique de niveaux de banquettes étagées a permis de reconstituer la séquence sédimentaire (et les variations de sa géométrie) de cette aggradation endokarstique disparue. Si les observations de terrain ne sont pas remplaçables, car c'est là que s'effectue le travail du géomorphologue, on comprend ici que le recours à la 3D apporte une plus-value réelle dans la méthode d'investigation du site étudié.

A l'échelle d'une paroi levée aussi par lidar, où une série de vagues d'érosion a pu être semi-automatiquement extraite pour en déduire une analyse statistique des directions, des pentes, des longueurs d'ondes. Des vitesses de paléo-circulation sont proposées et constituent un support possible à de prochaines recherches. Ce type de relevés, réalisés auparavant sur site, posait des problèmes d'accès, de protection mais aussi de répétabilité des mesures, problèmes largement résolus par une analyse sur modèle 3D.

Quelque soit l'échelle et quelque soit le résultat, dans chacun des cas, le traitement sur modèle 3D a finalement permis :

- de travailler en post-traitement, sur support informatique, en limitant le temps de présence sur le site, ce qui est précieux pour les sites à haute valeur patrimoniale où le temps de séjour est limité par souci de conservation ;
- d'atteindre une certaine complétude dans l'analyse de l'objet, c'est-à-dire de porter un regard statistique sur la totalité des conduits d'un système, sur toutes les micro-formes d'une paroi, ce qu'une investigation de terrain ne permet pas toujours (problème d'échelle, temps de présence, accessibilité physique (hauteur), accessibilité visuelle (éloignement), etc.) ;
- de porter un regard original sur le vide karstique. Qu'il s'agisse de drains ou de microforme, le géomorphologue pose son analyse sur une forme en creux, sur une matière disparue (ici la matrice calcaire) et sur l'empreinte de cet enlèvement.

On pourra dire qu'une telle analyse 3D éloigne du terrain. Pourtant, parcourir un modèle 3D « à la souris », en analyser les morphologies externe et interne, multiplier les angles de vues impossibles en réalité terrain, tester des outils statistiques, des outils d'extraction, réaliser une série d'ajustements sur des surfaces, n'est ce pas fondamentalement une démarche naturaliste ? La démarche de celui qui, partant de l'objet naturel, cherche à extraire toutes les informations qui pourront expliquer les raisons de sa genèse.

Il y a un siècle la démocratisation de la photographie puis la réalisation des premières cartes à grande échelle ont renouvelé le regard du géomorphologue sur son terrain d'étude sans pour autant l'en éloigner. Aujourd'hui l'apparition, et demain la démocratisation, des outils 3D et de réalité virtuelle, loin de nous éloigner du terrain, nous obligeront à poser un regard renouvelé sur cette nature. Le monde souterrain, le monde de l'endokarst qui nous est si cher, par sa difficulté inhérente à lui porter un regard externe et complet, mérite peut être plus que tout, l'application et le développement de telles investigations.

Remerciements

Nous tenons à remercier Daniel André pour ses éclairages précieux sur les premières représentations 3D de l'endokarst, Hélène Gispert du Groupe d'histoire et de diffusion des sciences d'Orsay pour l'envoi de références, Christophe Gauchon, pour ses réflexions sur l'histoire en spéléologie et toute l'équipe du collectif « Foussoubie » pour le travail en cours sur ce fabuleux réseau ardéchois.

BIBLIOGRAPHIE

- AZÉMA M., GÉLY B., LHOMME D., 2010. La grotte ornée paléolithique de la Baume-Latrone (France, Gard) : la 3D remonte le temps... in *L'Art Pléistocène dans le monde*, Pré-actes du Congrès de l'IFRAO, septembre 2010, Tarascon-sur-Ariège. 18 p.
- BES C., CENTELLES R., VAN STAeyEN R., 2007. Approche géomorphologique du siphon de Midroï. Rapport stage « équipier scientifique 2007 », Féd. Fr. Spéléologie, 47-56.
- BIGOT J.-Y., 2002. Conduits ascendants dans les Gorges de l'Ardèche: les avens Cordier, Rochas et de Noël. Actes de 12^{ème} rencontre d'Octobre, La Bachellerie, 15-19.
- BIRD A.J., SPRINGER G.S., BOSCH R.F., CURL R.L., 2009. Effects of surface morphologies on flow behavior in karst conduits. 15th International Congress of Speleology, 1417-1421.
- BRETZ J.H., 1942. Vadose and phreatic features of limestone caverns. *The Journal of Geology*, L, 6, II, 675-811.
- BUDAJ M., MUDRÁK S., 2008. Therion : Digital Cave Maps. 4th European Speleological Congress, 6 p. (<http://therion.speleo.sk/download.php>).
- CAPRIOLI M., MINCHILLI M., SCOGNAMIGLIO A., STRISCIUGLIO G., 2003. Using photogrammetry and laser scanning in surveying monumental heritage : le grotte di Castellana. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, 5/W12.
- CHAZALY B., SAILLANT M., VARREL E., 2010. La lasergrammétrie, un nouvel outil pour cartographier les cavités. Actes du colloque AFK - Pierre St. Martin 2007, *Karstologia Mémoires*, 17, 93-101.
- CHEVALIER P., 1944 a. Problèmes et hypothèses d'hydrologie souterraine. *Les Études rhodaniennes*, 19, 3-4, 228-234.
- CHEVALIER P., 1944 b. Distinction morphologique entre deux types d'érosion souterraine. *Revue de Géographie Alpine*, XXXII, 3, 475-492.
- CURL R.L., 1966. Scallops and flutes : *Cave Research Group Great Britain*, Trans., 7, 121-162.
- DROUIN P., 1993. Triptyque ardéchois. Rochas-Midroï-Guigonne. Concrétions et siphons à gogo. *Spéléo* n°11, 3-6 + carte HT.
- FAUCHER M., MAUTREF A., 1991. Spéléographie, 334 p.
- FILIPPONI M., DICKERT A., 2007. Verstehen der Speläogenese durch 3D-Analyse - Fallbeispiel des Lachenstock-Karstes. 12. Nat. Cong. of Speleology, Switzerland, 46-55.
- FILIPPONI M., JEANNIN P.-Y., 2008. What makes a bedding plane favourable to karstification? - The role of the primary rock permeability. Actes Congrès Vercors 2008, *Spelunca Mémoires* n°33, version complète dans *Spélescope* n°32/33, décembre 2008, pp. 22-27. <http://environnement.ffspeleo.fr/publications/spelescope/pdf/Scope32-33.pdf>
- GAUCHON C., 1997. Des cavernes et des hommes, Géographie souterraine des montagnes françaises. *Karstologia Mémoires*, 7, 248 p.
- GOODCHILD M.F., FORD D.C., 1971. Analysis of scallop patterns by simulation under controlling conditions. *Journal of Geology*, 79, 52-62.
- GARNIER J.-J., 2008. Grotte de la Luire, 1896-1996, un siècle d'exploration. Seconde édition GSV, 512 p., carte HT.
- HÄUSELMAN P., 2010. Spéléogenèse dans la zone épinoyée, un nouveau modèle. Grottes et karsts de France. *Karstologia Mémoires*, 19, 46-47.
- HELLER M., 1983. Toporobot, Höhlenkartographie mit Hilfe des Computers. *Stalactite*, 33, 1, 9-27.
- HOROVI V., 2001. L'influence de la géologie sur la karstification. Etude comparative entre le Massif d'Obarsia Closani – Piatra Mare (Roumanie) et le Massif d'Arbas (France). Thèse Univ. Toulouse III, 165 pages
- JAILLET S., SADIÉ B., DELANNOY J.-J., PLOYON E., 2010. Identification de morphologies pariétales en grotte à partir d'un lever laser 3D. Application aux salles rouges de l'Aven d'Orgnac (Ardèche, France). Actes colloque « Techniques Laser pour l'Etude des environnements naturels et urbains ». *Revue SFPT*, 191, 3-8.
- LE ROUX P., 1984. Système Goule/Event de Foussoubie. Historique résumé de son exploration. *SERAHV*, 18, 12-20, carte HT.
- LISMONDE B., 1991. Le Trou qui Souffle. Comité départemental de Spéléologie de l'Isère.
- MARTINEAU F., 2003. Approche géologique de la karstification : état d'avancement des travaux sur la Dent de Crolles. Actes de la 13^{ème} rencontre d'Octobre, St. Christophe la Grotte, 87-93.
- MARTEL E.A., 1905. Spéléologie au XX^e siècle. *Spelunca*, 568-570.
- MEUNIER S., 1902. Etude expérimentale des puits naturels, des cavernes et des autres cavités où se fait, dans les Causses, la circulation des eaux souterraines. *Rev. A.F.A.S.* (Association Française pour l'Avancement des Sciences), congrès de Montauban, 31^{ème} session, 1^{ère} partie, p. 218.
- SADIÉ B., JAILLET S., PERRETTE Y., 2006. La topographie 3D haute résolution : un outil pour l'étude des structures karstiques. 8th conference on limestone hydrology, 235-236.
- SHAW T.R., 1992. History of cave science. The exploration and study of limestones caves, to 1900. The Sydney Speleological Society, second edition, 338 p.

ENREGISTREMENT ET MODÉLISATION 3D DE LA FOUILLE ARCHÉOLOGIQUE ET PALÉONTOLOGIQUE DU CÔNE D'ENTRÉE D'ORGNAC ARDÈCHE, FRANCE

*REGISTRATION AND 3D MODELING OF THE ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION OF ORGNAC AVEN
ARDÈCHE, FRANCE*

ÉLISA BOCHE ^{1,2}, LYDIA GAMBERI A. de C. ³, STÉPHANE JAILLET ², BENJAMIN SADIÉ ^{2,4}

¹ Centre National de Préhistoire, 38 rue du 26° RI, 24000 Périgueux, France.

² Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, Pole Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

³ Musée de Préhistoire, Site d'Orgnac, 07150 Orgnac l'Aven, France.

⁴ Cabinet Perazio, 137 rue Mayoussard, 38430 Moirans, France.

RÉSUMÉ

Le cône d'éboulis de l'aven d'Orgnac constitue un dépôt endokarstique qui a pu accueillir une faune piégée au cours du Quaternaire. Il présente une morphologie pure, non contrainte par des effets de paroi. Depuis deux ans, ce cône fait l'objet d'une fouille archéologique et paléontologique et d'un suivi des surfaces décapées par relevé lasergrammétrique. Ce travail préliminaire montre l'intégration des données spatialisées de la fouille dans le modèle 3D et présente quelques perspectives : ajustement de surfaces sédimentaires, analyse taphonomique, restitution 3D et réalité virtuelle.

MOTS-CLÉS : MODÉLISATION 3D, STRATIGRAPHIE, CÔNE SOUTERRAIN, AVEN D'ORGNAC, ARDÈCHE.

ABSTRAC

The underground deposit of the Orgnac aven is an accumulation that could host a wildlife trapped in the Quaternary. It has a pure morphology, unconstrained by wall effects. For two years, this deposit is the subject of archaeological and paleontological excavations and is studied by lasergrammetry. This preliminary work shows the integration of spatial data for the research in the 3D model and presents some perspectives: sedimentary surface fitting, taphonomic analysis, 3D reconstruction and virtual reality.

KEYWORDS: 3D MODELING, STRATIGRAPHY, UNDERGROUND DEPOSIT, ORGNAC AVEN, ARDÈCHE.

INTRODUCTION

Objet vertical par excellence, l'aven est rarement considéré comme un bon piège endokarstique et c'est plus souvent vers les galeries de l'endokarst que l'étude des remplissages s'est tournée jusqu'à présent. Ainsi en est-il des études paléogéographiques sur temps long, menées sur de célèbres karsts comme celui de la Pierre Saint Martin (Maire, 1990), du Vercors (Audra, 1995 ; Delannoy, 1997) ou d'ailleurs. Pourtant, si « *peu de remplissages d'ovens ont été étudiés, (...) ces cavités verticales, s'ouvrant à la surface des plateaux, sont d'excellents pièges de la faune naturelle. Les restes fossiles présentent des conditions de conservation excellentes avec parfois des squelettes en connexion anatomique. La faune peut alors servir de référence paléobiologique, biochronologique et paléoenvironnementale* » (Debard, 1997). De fait, les archéologues et les paléontologues se sont précocement intéressés aux entrées des cavités et aux avens pièges et ont très tôt compris l'intérêt de tels sites, parfois utilisés par l'homme. Les exemples d'Ornac III (Moncel, 1996),

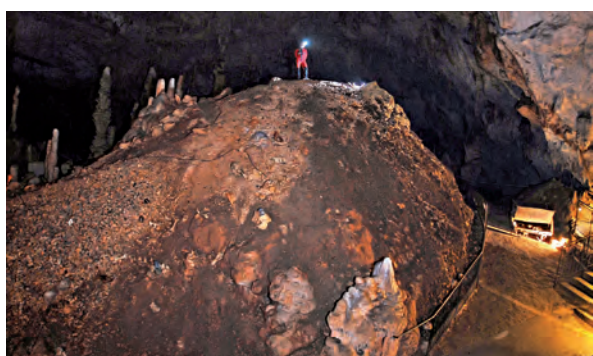


Photo 1 - Vue générale du cône d'éboulis de la salle de Joly (avec d'Ornac). L'accès est facilité par le cheminement touristique. Photo Stéphane Jaillet.

de la Caune de l'Arago (de Lumley, 1984), de la grotte des Fieux (Champagne et Jaubert, 1986) ou plus récemment de Coudoulous (Kervazo *et al.*, 2008) montrent l'intérêt de ce type de formation.

Cependant, dans la plupart de ces cas, le remplissage sédimentaire est si important que la cavité est en grande partie comblée et l'analyse des structures sédimentaires est limitée aux coupes que l'organisation de la fouille a permis de dégager. De plus, la proximité des parois de la cavité implique une contrainte forte sur cette organisation sédimentaire ce qui complique d'autant l'agencement stratigraphique.

L'aven d'Ornac (Ardèche) est une cavité majeure du sud-est de la France et la salle d'entrée est occupée en partie par un important cône détritique à l'aplomb du gouffre éponyme (Photo 1). D'un diamètre d'environ 30 m, à la base d'un puits d'une quarantaine de mètres, ce cône a trouvé là un espace important lui autorisant un développement sans importante contrainte de bord, ce dont témoigne sa forme légèrement dissymétrique. Il semblait donc prédisposé à une étude à la fois de sa morphologie externe comme de ses structures sédimentaires qui scandent son édification au cours du temps. D'accès aisé, au départ de la visite touristique de l'aven d'Ornac, le cône se prêtait bien à l'organisation d'une fouille d'envergure et celle-ci a débuté en 2009 par un premier décapage (Photo 2a et 2b). En outre, le projet se situe dans un contexte scientifique où la faune pléistocène régionale a déjà été clairement identifiée comme à l'aven de l'Arquette (Gamberi, 2009).

Il apparaissait nécessaire de disposer d'une reconstitution 3D de l'édification du cône au cours de temps, afin d'obtenir à terme un modèle 3D spatial et diachronique de la mise en place du dépôt, permettant de croiser les informations issues de la fouille. Les premiers résultats montrent en quoi le recours aux technologies 3D (relevés par lasergrammétrie et traitement sur logiciel

de retro-ingénierie) permet aujourd'hui de mettre en œuvre une véritable analyse 3D de l'édification sédimentaire d'un objet important de l'endokarst. Cet outil apporte une meilleure compréhension de la mise en place du cône d'éboulis et des éléments paléontologiques associés, et les possibilités de développement ultérieurs ouvrent des perspectives intéressantes, notamment en termes de modélisation.



Photos 2a et 2b - Mise en œuvre de scanner 3D longue et courte portée ; a) le lidar Leica HDS6000 en bas du cône pour un scan du versant ; b) au cœur de la fouille pour une vue de détail. Les sphères servent à la consolidation des différentes positions acquises. Photos Stéphane Jaillet.

I - MÉTHODES ET OUTILS

1 - L'enregistrement spatial des données archéologiques et paléontologiques

L'enregistrement 3D par scanner terrestre ou la reconstitution 3D à partir de levés tachéométriques en archéologie a le plus souvent trouvé application dans les domaines de l'architecture ou pour l'étude d'objets mobiliers (Leon, 2006 ; Mora, 2008), et ont plus rarement été appliqués à la reconstitution d'unités stratigraphiques (Loisier *et al.*, 2007). Si l'enregistrement tridimensionnel des vestiges est un prérequis à toute intervention archéologique, il est intéressant de l'élargir à son contexte : ici sédimentaire et morphologique.

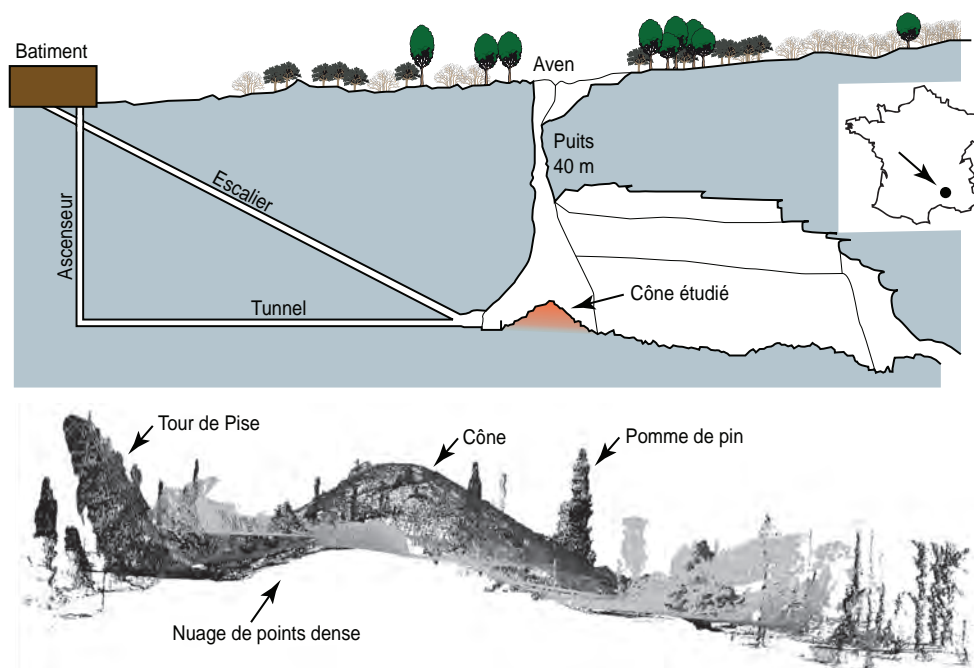
Les relevés par les archéologues ont été effectués en trois dimensions selon des méthodes classiques et adaptées au milieu souterrain : lunette de chantier pour les altitudes et report en plan des axes X et Y sur papier millimétré selon un carroyage métrique matérialisé à la surface du cône pour l'enregistrement des vestiges, réalisation de plans (échelle 1/10) et coupes (échelle 1/20) détaillés. Il n'était pas question de remettre en cause cette méthodologie de travail éprouvée par ailleurs, mais bien de s'y adapter en la complétant par des relevés denses, ce que les technologies lidars (Light Detection And Ranging) autorisent justement (Grussenmeyer et Landes, ce volume).

2 - L'acquisition 3D par lasergrammétrie

La topographie de la surface du cône a été relevée à plusieurs reprises avec un LiDAR terrestre. Dans un premier temps, afin d'obtenir une image de référence avant toute intervention archéologique et d'enregistrer de l'information sur le contexte morphologique, un scan 3D a été réalisé en 2008, depuis le puits surplombant le cône avec un lidar longue portée Optech Iris3D. Complété par des relevés sous terre de la voûte et des parois, le modèle 3D restitue ainsi la surface du cône dans l'environnement

topographique et géomorphologique (puits et voûtes) de la salle de Joly (Figure 1). Ce type de scan préliminaire permet, au-delà de l'analyse topographique et géomorphologique, de conserver une archive numérique d'un objet, ici à haute valeur patrimoniale, situé en site classé. Pour compléter cette image de référence, un second scan, uniquement de la surface du cône a été réalisé avec un scanner à décalage de phase Leica HDS6000 (Grussenmeyer et Landes, ce volume). La précision du point est millimétrique et le pas d'échantillonnage de l'ordre de 2 mm à 10 m. Enfin, l'objectif du projet est que pour chaque fin de campagne de fouille, un relevé complet de la surface décapée soit effectué. Pour l'heure, seule une campagne de fouilles a pu être menée et a pu faire l'objet d'un levé (Figure 2).

Afin d'assembler et de connecter ces données entre elles, un référentiel spatial commun a été adopté. Ce référencement des scènes est basé sur un certain nombre de points topographiques matérialisés dans la grotte et relevés au tachéomètre (station totale Leica TCR 407). Ces points de coordonnées connues permettent de référencer des sphères placées dans la scène de scan pendant la phase d'acquisition 3D, et permettent ensuite d'assembler entre eux les nuages de points produits. À terme, tous les modèles successifs seront placés dans un même repère, par ailleurs rattaché au système Lambert III, sur la base du plan topographique de la grotte réalisé en 2000 par le cabinet G. Perazio. Les points de carroyage et le référentiel d'altitude de la fouille ont de même été topographiés et recalés dans



Localisation du site étudié et coupe générale de la salle de Joly. Notez en haut le cône d'éboulis, à la base du puits de 40 m. En bas, vue sagittale du nuage de points acquis par lasergrammétrie. Ce nuage permet de reconnaître les différents éléments caractérisant le cône lui-même (dont la morphologie est peu dégradée) ainsi que les concrétions majeures qui le bordent (Tour de Pise, Pomme de pin).

le même système de référence. Cette méthodologie a permis d'intégrer les données acquises spatialement par différents moyens, sans pour autant se substituer ou changer les méthodes et les outils propres à chaque acteur (archéologie, géomorphologie, topographie) qui ont donc été exploités en complémentarité.

Une fois les nuages de points traités, nettoyés et maillés, c'est-à-dire transformés en modèle RTI (Réseau de Triangles Irréguliers) dans le logiciel *3DReshaper*, les polygones du carroyage et autres

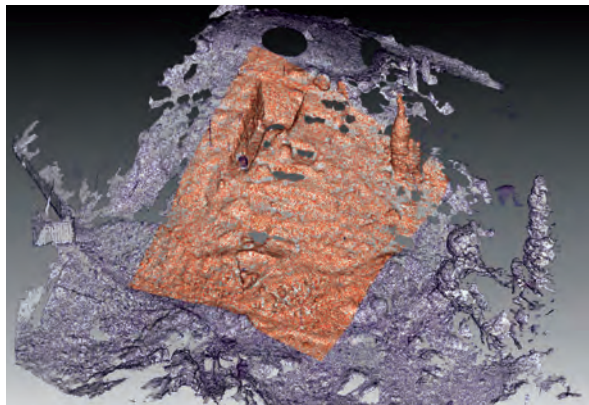


Figure 2 - Vue des nuages de points assemblés pour construire le modèle 3D

semis de points sont créés en CAO (*Autocad Covadis*) et importés dans le modèle 3D, ou directement générés dans le modèle (Figure 3). Les relevés archéologiques (coupes et plans) informatisés peuvent alors être projetés dans le modèle 3D sur des axes et plans créés à partir du carroyage, où directement texturés (on dire parfois drappé) sur le maillage (Figure 4). On peut ainsi recréer différents nuages de points, polygones ou surfaces correspondant à l'information que l'on souhaite ajouter au contexte, en 3D.

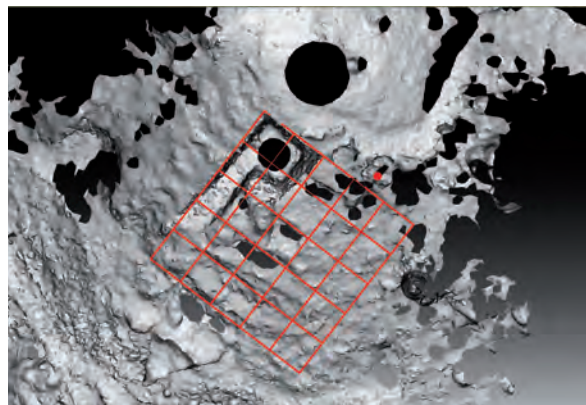


Figure 3 - Détail du modèle 3D (vue en plan) au droit de la fouille. Le carroyage et le point zéro de la fouille sont intégrés dans le modèle.

II - RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES : VERS UNE COMPRÉHENSION 3D

Une seule campagne de fouille ayant eu lieu, il n'est pas possible pour l'heure de présenter les résultats finaux de ce travail qui s'étalera sur plusieurs années. Nous présentons simplement ici quelques résultats préliminaires en montrant les perspectives qu'offrent déjà la méthode.

Ces résultats et perspectives préliminaires se déclinent en trois thématiques :

- constitution d'une « mémoire numérique » et réalité virtuelle ;
- analyse 3D de la répartition des vestiges ;
- ajustement 3D et reconstitution de la géométrie des unités stratigraphiques

1 - La constitution d'une mémoire numérique haute résolution du cône

Les différentes séances de scan constituent des images 3D hautes résolutions de ce cône à chaque étape de la fouille. Sans remplacer la photographie et le relevé archéologique, le nuage de points est une image complémentaire qui apporte une information géométrique très dense. Dans un contexte légitime de conservation (ici en site classé), ces « clones numériques » constituent, à chaque étape, une mémoire numérique

de ce que la fouille détruit irrémédiablement.

Cette archive 3D de la géométrie avant et au cours de la fouille, offre en outre plusieurs applications, en terme de restitution : reconstitution virtuelle des éléments détruits à la fouille, intérêt pour la restitution au public (particulièrement intéressant ici dans un site touristique visité par plus de 100 000 personnes chaque année), génération de cartes et documents topographiques, estimation des volumes de sédiments extraits... Les perspectives ne manquent pas et la réalité virtuelle sur ce type d'objet n'en est qu'à ses débuts.

2 - Une analyse 3D de la répartition de la faune dans la fouille

Ce type d'enregistrement fournit une aide à la compréhension de la distribution des vestiges archéologiques et/ou paléontologiques, en lien avec la structure sédimentaire du cône (Figure 5). Cette aide peut se décliner à deux échelles différentes : (i) à l'échelle du dépôt d'abord. En repositionnant les données de la fouille en 3D, il est possible de visualiser et d'évaluer plus finement la dynamique des dépôts ayant impliqué le déplacement progressif des vestiges. Le remontage

virtuel des ossements à partir des observations taphonomiques et de la fracturation pourra être testé afin de valider différentes hypothèses de distribution initiale et d'évolution des dépôts. (ii) A l'échelle du site complet (le puits et son cône), il sera possible de tester la (ou les) trajectoire (s) possible (s) pour des animaux de différentes tailles chutant d'une hauteur de plus de 40 m. Ces tests, qui restent à conduire, ouvrent une perspective originale dans l'analyse taphonomique des vestiges paléontologiques à cette échelle.

3 - Un ajustement 3D des unités stratigraphiques

Les observations stratigraphiques, relevés en coupe sur les parois du sondage en fin de campagne de fouille, sont projetées dans le modèle 3D. Les différentes unités et structures sédimentaires identifiées sont alors digitalisées et permettent de générer des polygones 3D qui constituent les sections et interfaces des différentes unités stratigraphiques. Ce travail a pu être testé sur les trois faces du sondage (Figure 4). Les polygones 3D sont alors associées et servent de support à un maillage 2,5D (plan de référence : XY) permettant de générer des portions de maillage. Ces surfaces étagées (Figures 4 et 6) constituent alors (à l'échelle de la fouille) une image 3D de la succession stratigraphique identifiées dans le cône. Globalement, elles s'organisent selon des surfaces non planes, parallèles à la surface topographique externe du cône. Il est intéressant d'analyser leur position relative et d'identifier le recoupement entre plusieurs niveaux obliques. A plus long terme, ces surfaces pourront ensuite être extrapolées à tout le volume du cône, bien que cela impliquera des hypothèses assez fortes sur leur géométrie.

Associé à cet ajustement 3D, il est envisagé de dater ces différentes unités stratigraphiques (sur ossements, sur artefacts attendus ou sur spéléothèmes déjà identifiés). Le contrôle chronologique qu'offriront ces datations sera intégré dans le modèle pour proposer de nouvelles images 3D comme la répartition spatiale du taux de sédimentation. Ce type de modèle 3D servira alors de support à la réflexion sur les réajustements sédimentaires qui affectent la construction du cône et sur les conséquences taphonomiques que cela implique.

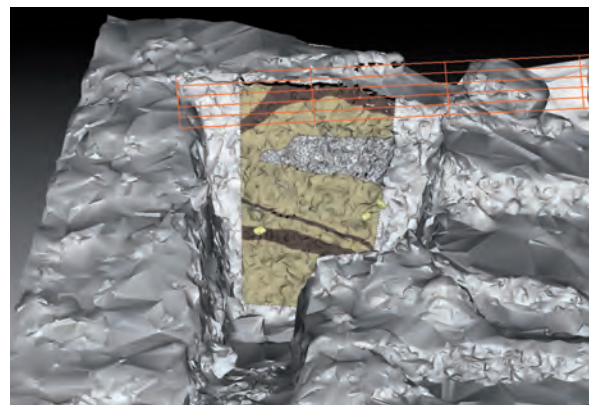


Figure 4 - Le texturage des coupes permet de générer des polygones 3D sur le modèle et à partir du relevé des fouilles. Traitement réalisé sur 3DReshaper.

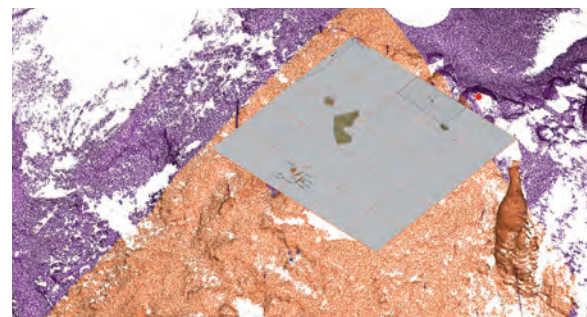


Figure 5 - Répartition des vestiges osseux issus de la campagne de fouille 2009.

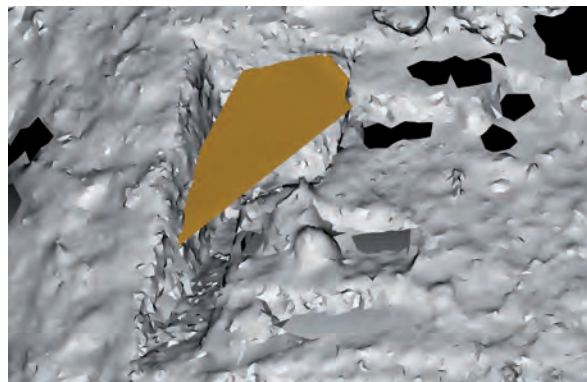


Figure 6 - Ajustement 2,5D d'une surface sédimentaire sur le flanc oriental du cône d'Ornac, à partir d'un ensemble de polygones 3D réalisée sur les coupes texturées.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les objectifs et applications de ce travail servent aussi bien la connaissance paléontologique que la compréhension globale de la mise en place du cône au cours du temps dans son contexte karstique, au travers d'une visualisation 3D. C'est donc un processus combinant relevé archéologique classique, levé au tachéomètre et lasergrammétrie qui demande peu d'investissement

en temps, et permet toutefois d'améliorer considérablement la visualisation et l'analyse des données par la reconstruction virtuelle, tout en offrant un intérêt conservatoire avec un "clone" numérique.

Le modèle 3D spatial et diachronique (par datations U/Th sur spéléothèmes ou sur artefacts) doit permettre, à terme, d'aller vers le contrôle chronologique de la

mise en place du cône et donc vers une analyse spatialisée des vitesses de sédimentation. D'autres perspectives s'ouvrent alors, en particulier en intégrant la zone extérieure et le puit dans le fonctionnement du cône : des hypothèses balistiques relatives à la chute de la faune dans l'aven pourraient être testées dans le modèle, sur la base de la répartition des ossements et des impacts observés, en travaillant sur les trajectoires et vitesses de chute.

La poursuite de l'acquisition de données paléontologiques, préhistoriques et environnementales potentiellement présentes à la fouille, qui n'a fait actuellement l'objet que d'une campagne, devrait apporter de nouvelles informations sur la dynamique de piégeage sédimentaire endokarstique. Au-delà des résultats dépendants de l'avancée de la fouille, cette démarche constitue une approche originale de ce type d'objet sédimentaire en milieu karstique.

Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur aide : Françoise Prud'homme, Matthieu Thomas, Nicolas Lateur, Sonia Stochetti, Caroline Carpent, Rachel Peltier-Muscateli, Stéphane Tocino et le cabinet Guy Perazio.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDRA P., 1995. Signification des remplissages des karsts de montagne, quelques clés à l'usage des spéléologues. FFS, AFK, *Karstologia*, 25, 13-20.
- CHAMPAGNE F., JAUBERT J., 1986. Un exemple de remplissage archéologique en milieu karstique: la grotte des Fieux, à Miers (Lot). *Bulletin de la Société Méridionale de Spéléologie et de Préhistoire*, 26, 21-33.
- DEBARD E., FAURE M., GUERIN C., ARGANT J., JEANNET M., 1999. Le gisement pléistocène de l'aven Flahaut à Saint-remèze (Ardèche). *Ardèche Archéologie*, 16.
- DEBARD E., 1997. Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais : Karstogénèse, sédimentogénèse et archéologie. *Quaternaire*, 8, 2-3, 305-317.
- DELANNOY J.-J., 1997. Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la Transversale de Ronda. Thèse d'Etat. Grenoble, Septentrion, 678 p.
- LUMLEY H., FOURNIER A., PARK Y.C., YOKOYAMA Y., DEMOUY A., 1984. Stratigraphie du remplissage Pléistocène moyen de la Caune de l'Arago à Tautavel. Etude de huit carottages effectués de 1981 à 1983. *L'Anthropologie*, 88, 1, 5-18.
- GAMBERI A. DE C. L., 2006. Rapport du sondage à l'aven du Colombier (commune de Barjac-30). Musée Régional de Préhistoire-Orgnac l'Aven, Ardèche.
- GAMBERI A. DE C. L. (responsable), JAILLET S., SADIÉ B., BOCHE E., LATEUR N., STOCCHETTI S., PRUD'HOMME F., CARPEN C., PELTIER-MUSCATELI R., 2010. Cône d'éboulis – Salle Robert de Joly de l'aven d'Orgnac, Rapport 2009/2010 (Orgnac-l'Aven, Ardèche). Fouille programmée n° 10222, 103 p.
- GILLI E., 1984. Recherches sur le creusement et la stabilité des grands volumes karstiques souterrains, application au creusement des cavités artificielles de grande taille. Thèse de doctorat, Université de Provence Aix Marseille, laboratoire de géologie appliquée
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., 2011. Lasergrammétrie terrestre. *Collection EDYTEM*, 12, 11-28.
- JAILLET S., SADIÉ B., DELANNOY J.-J., 2009. Cartographie détaillée du cône d'entrée. Chapitre 6, Aven d'Orgnac - Géomorphologie, sédimentologie, archives naturelles et modélisation 3D. EDYTEM/DREAL – Rapport final, 75-88.
- JAILLET S., SADIÉ B., HAJRI S., BOCHE E., DELANNOY, J.-J., PLOYON E., THOMAS M., VILLEMEN T., 2010. Technologies lidar et 3D pour l'étude de formes et de dépôts de l'endokarst. 23° (RST), Bordeaux, résumé, 1p.
- KERVASO B., JAUBERT J., BRUXELLES L., FERRIER C., KERAVIS D., KONIK S., 2008. Géologie de Coudoulous I. Journées AFK/AGSO/CFH 11 au 14 septembre 2008 - Excursions en Quercy – Livret-Guide.
- LEON J.-C., VERON P., PERNOT J.-P., 2006. Obtaining usable 3D Models from Scanned Archaeological Sites, In : Vergnien R. et Delevoie C. (dir.), Actes du colloque Virtual Retrospect 2005, 8-10 novembre 2005 (Biarritz), Ed. Ausonius, Bordeaux, 18-25.
- LOISIER L.-M., POULIOT J., FORTIN M., 2007. 3D geometrical modeling of excavation units at archaeological site of Tell'Acharneh (Syria). *Journal of Archaeological Science*, 34, 272-288.
- MAIRE R., 1990. La haute montagne calcaire. Thèse d'Etat, 731 p. *Karstologia mémoires*, 3.
- MONCEL M.-H., 1996. Les niveaux profonds du site Pléistocène moyen d'Orgnac 3 (Ardèche, France) : habitat, repaire, aven-piège ? L'exemple du niveau 6. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 93, 4, 470-481.
- MORA P., VIVIER A., 2008. Le levé tachéométrique et son utilisation dans la numérisation 3D de sites archéologiques, In Vergnien R. et Delevoie C. (dir.), Actes du colloque Virtual Retrospect 2007, 14-16 novembre 2007 (Pessac), Ed. Ausonius, Bordeaux, 203-206.
- NOURY M., DELANNOY J.-J., JAILLET S., SADIÉ B., 2007. Le cône d'éboulis de l'aven d'Orgnac. Chapitre 5, Aven d'Orgnac - Géomorphologie, sédimentologie, archives naturelles et modélisation 3D. EDYTEM/DREAL – Rapport d'étape n°2, 77-95.
- SADIÉ B., JAILLET S., DELANNOY J.-J., 2007. Etude à haute résolution du cône d'éboulis de la salle de Joly. Chapitre 6, Aven d'Orgnac - Géomorphologie, sédimentologie, archives naturelles et modélisation 3D. EDYTEM/DREAL – Rapport d'étape n°2, 97-104.

RELEVÉS LASERGRAMMÉTRIQUES ET CALIBRATION SUR CALCITE DE MORPHOLOGIES EXTERNES DE SPÉLÉOTHÈMES POUR UNE ÉTUDE PALÉO-SISMOLOGIQUE DU LIBAN

*LASERGRAMMETRY AND CALIBRATION OF EXTERNAL MORPHOLOGY OF SPELEOTHEM
FOR PALEO-SEISMIC STUDY OF LEBANON*

BENJAMIN SADIER^{1,2}, CORINNE LACAVE³, JEAN-JACQUES DELANNOY¹, STÉPHANE JAILLET¹

¹ Laboratoire Edytem, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

² Cabinet Perazio, 137 rue du Mayoussard, 38430 Moirans, France.

³ Résonance Ingénieurs-Conseils SA, 21 rue Jacques Grosselin, 1227 Carouge, Suisse.

RÉSUMÉ

Cet article présente les travaux de recherche engagés par le laboratoire Edytem dans le cadre du programme ANR Libris sur la paléo-sismicité du Liban. L'originalité de cette étude est la mesure sur un modèle numérique 3D d'indices paléo-sismiques dans l'endokarst et plus particulièrement dans la morphologie des spéléothèmes. Nous présentons ici la validité de la mesure au Lidar terrestre de tels objets en mettant en place un protocole expérimental spécifique à la calcite rencontrée dans le milieu souterrain. Une évaluation du bruit et des erreurs de mesure sur calcite est proposée. Cependant si la position des objets mesurés n'est pas satisfaisante, la méthode reste valide pour des mesures géométriques des repousses de stalactites.

MOTS-CLÉS : LIDAR, LASERGRAMMÉTRIE, PALÉO-SISMICITÉ, CALCITE, JEITA, LIBAN.

ABSTRACT

This paper presents the research undertaken by the laboratory EDYTEM in the program Libris on the paleo-seismicity in Lebanon. The originality of this study is the measurement on a 3D digital model of paleo-seismic clues in caves and especially in the morphology of speleothems. We present here the validity of the lasergrammetry measurement by setting up an experimental protocol on calcite coming from the underground environment. An assessment of noise and measurement errors on calcite is proposed. The method remains valid for geometric measurement of stalactites but not for the location, which is not important for this study.

KEYWORDS: LIDAR, LASERGRAMMETRY, PALEO-SEISMICITY, CALCITE, JEITA, LEBANON.

INTRODUCTION

Un grand nombre d'études en paléo-sismologie recherche les témoins d'anciens séismes inscrits dans des dépôts géologiques. Elles ont pour objectif d'identifier l'importance et la récurrence d'anciens événements sismiques et de compléter les connaissances sur la sismicité d'un lieu au-delà des suivis instrumentaux (dernier siècle) et des archives historiques (millénaire). La méthode consiste classiquement à identifier, le long d'une faille connue ou présumée active, des séries sédimentaires suffisamment continues pour enregistrer des déformations entraînées par un ou plusieurs séisme(s) (Daëron, 2007). D'autres marqueurs permettent d'appréhender des paléo-séismes et leur intensité. C'est le cas des spéléothèmes (stalactites et stalagmites)

(Lacave, 1999, 2002). En effet, l'analyse géométrique, puis statistique, des morphologies externes des concrétions intactes ou brisées, *a priori* par un séisme, permet de déduire l'amplitude des ondes sismiques responsables de la rupture des spéléothèmes. En préalable à ce projet, nous exposons ici une méthode d'acquisition à haute résolution de données géométriques de spéléothèmes par relevé lasergrammétrique et la question de leur validité pour cet objectif. Après avoir présenté le contexte et défini les enjeux scientifiques, le protocole expérimental mis en œuvre en laboratoire est ici développé. Enfin, nous reviendrons sur l'acquisition des données sur le terrain qui a permis d'obtenir des premiers résultats.

I - CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

Ce travail s'inscrit dans le projet de recherche ANR LIBRIS piloté par le laboratoire ISTerre (OSUG, Grenoble) portant sur la vulnérabilité du Liban face au risque sismique.

Ce pays est traversé du sud au nord par un faisceau de failles décrochantes senestres (faille du Levant), qui sépare les plaques tectoniques africaine et arabe (Figure 1). Caractérisé historiquement par des séismes majeurs en 551, 1202 et 1759 AD, d'une magnitude respective de 7,2, 7,6 et 7,4 (Ambraseys *et al.*, 1988 ; Ambraseys *et al.*, 1989 ; Darawchah *et al.*, 2000), l'activité sismique et paléo-sismique reste encore mal connue. Ainsi, parallèlement à la mise en place d'un réseau instrumenté (GPS et stations sismologiques) pour étudier la tectonique active, des recherches en paléo-sismologie sont entreprises afin d'étudier les événements passés tout en caractérisant si possible leur fréquence dans le temps ainsi que leur ampleur.

Dans le poljé de Yamouneh (plaine de la Bekaa) traversé par une faille active, des recherches récentes (Daëron *et al.*, 2005 ; Daëron *et al.*, 2007) ont mis en avant l'existence de treize séismes depuis 12000 ans BP. La méthode est basée sur l'identification de décalage

et de décrochage au sein des dépôts lacustres. La datation des dépôts affectés par ces déformations permet de préciser l'occurrence sismique et contribue, par ce fait, à une reconstitution historique de l'activité sismique de cette faille. Les résultats obtenus indiquent que l'activité sismique est récurrente au Liban. Dans ce contexte, l'étude de spéléothèmes comme marqueurs de séismes anciens offre un triple intérêt :

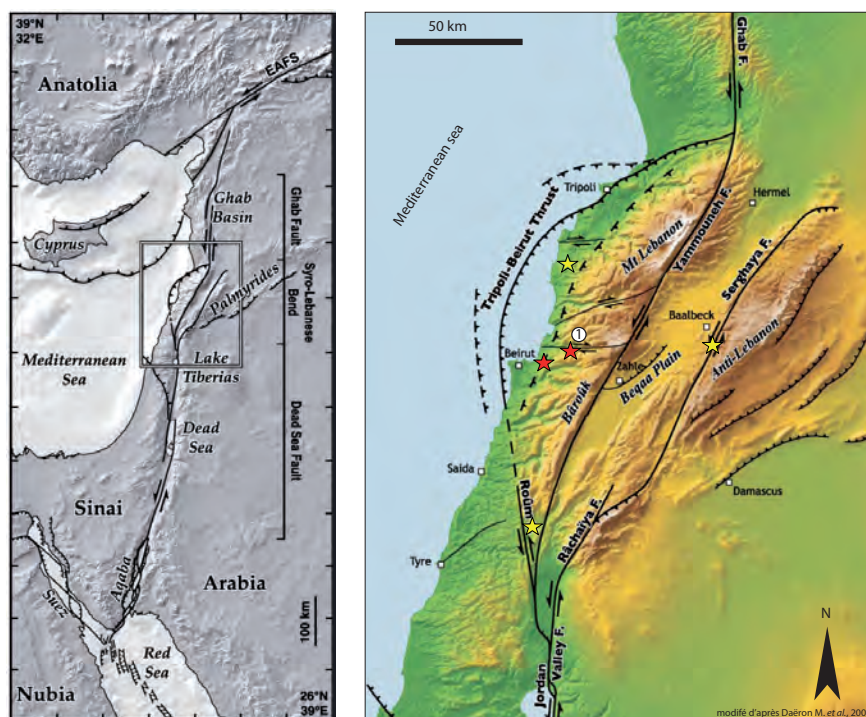


Figure 1 - Localisation du système de failles du Levant et des cavités actuellement investiguées dans le cadre du programme ANR Libris.

– étendre la connaissance des paléo-séismes au delà des secteurs possédant des séries sédimentaires déformées. Au moins 13 séismes ont eu lieu depuis 12 000 ans BP avec un foyer particulièrement actif dans la plaine de la Bekaa (Daëron *et al.*, 2007). Le caractère montagneux et karstique de la géographie libanaise limite les zones disposant de séries lacustres. De fait la connaissance de la répartition de la sismicité sur l'ensemble du territoire reste géographiquement ponctuelle et les nombreuses cavités du Liban offrent une opportunité de disposer d'autres indices sur ces événements sismiques :

– évaluer l'ampleur (magnitude, accélération du sol) des paléo-séismes. En effet, il est possible d'estimer l'accélération du sol qu'il a fallu pour briser une concrétion à partir d'une modélisation basée sur l'examen de sa morphologie (Becker *et al.*, 2006 ; Lacave *et al.*, 2000, 2002) ;

– remonter loin dans le temps. En effet, le caractère abrité de l'endokarst vis-à-vis de l'érosion de surface lui confère une relative « immunité » (Delannoy, 1997), préservant ainsi la géométrie originelle des sédiments anciens. Les stalagmites se prêtent aux datations U/Th et U/Pb et permettent dès lors de proposer une chronologie couvrant l'ensemble du Quaternaire.

Cependant la quantification de tels événements dans le milieu souterrain comporte des limites :

– pouvoir déterminer si l'origine de la brisure des spéléothèmes est d'origine sismique ou non. La réponse à cette limite repose sur la connaissance

géomorphologique des sites étudiés (Becker *et al.*, 2006 ; Gilli *et al.*, 1999). Une étude préalable est nécessaire afin de valider l'hypothèse « tremblement de terre » ; celle-ci doit notamment comporter des renseignements d'ordre historique (date de la découverte de la cavité, activités de vandalisme ou de pillage, tirs de carrière à proximité, bombardements à proximité, etc.) ;

– l'impossibilité de retrouver plusieurs événements sismiques dans une seule concrétion, à moins de la prélever et de réaliser de nombreuses analyses (Nader *et al.*, 2007). L'étude d'une population de spéléothèmes permet plutôt de répondre à la question de l'accélération maximale atteinte, ou jamais dépassée, dans une région (paramètre primordial et difficilement accessible, pour la caractérisation de la sismicité historique d'une région), plutôt que de distinguer différents événements sismiques individuels ;

– la validité statistique des mesures. Une réponse à cette limite est offerte par la multiplication du nombre de mesures effectuées sur le terrain, ainsi que du nombre de cavités étudiées.

C'est en tenant compte de ce cahier des charges particulier que nous avons acquis des données sur le terrain *via* le lidar terrestre. En effet, le protocole de mesure de la paléo-sismicité par l'étude des spéléothèmes (Lacave *et al.*, 1999, 2001) impose la connaissance du diamètre et de la longueur de chaque échantillon. Ces valeurs sont traitées statistiquement pour calculer l'accélération nécessaire à leur rupture.

II - PROBLÉMATIQUE DE L'ACQUISITION DE DONNÉES SUR LE TERRAIN : ÉLABORATION D'UN PROTOCOLE SPÉCIFIQUE À LA CALCITE

Jusqu'alors, les mesures effectuées sur les stalactites se faisaient à partir de photographies mises à l'échelle (à l'aide d'une mire). Cette méthode d'acquisition, pertinente lorsqu'on travaille sur quelques concrétions, devient vite fastidieuse voir impossible si on désire travailler sur une grande population de concrétions et dans des cavités de grande dimension. En effet, pour conserver les caractéristiques géométriques correctes des objets photographiés, il faut que ceux-ci se situent dans le même plan que l'échelle. Il est souvent difficile sur le terrain de faire un seul cliché d'un ensemble de concrétions. Travailler sur plusieurs dizaines de concrétions implique donc une quantité importante de clichés. De plus, selon la dimension de la cavité, il n'est pas toujours aisé d'atteindre les objets à photographier, surtout lorsque ceux-ci sont au plafond, même au moyen d'une perche. De fait, dans certains cas, il n'est pas possible de photographier de façon correcte (échelle et éclairage) les objets à mesurer.

En réponse à ces difficultés d'acquisition, nous avons entrepris de travailler à partir de modèles numériques de terrain à haute résolution acquis par relevé lasergrammétrique.

1 - Validité des mesures lasergrammétiques sur calcite

Avant la mise en œuvre de ce procédé sur le terrain, nous avons souhaité valider en laboratoire la faisabilité de la mesure par laser sur un matériau translucide comme la calcite. Des relevés effectués sur d'autres cavités laissent entendre que les propriétés optiques de la calcite tendent à modifier la trajectoire du laser, ce qui induit des erreurs de mesure quant au positionnement réel du faisceau lumineux. En pénétrant dans la matière, le faisceau laser restitue une distance parcourue plus grande que la distance réelle entre l'appareil

de mesure et la surface de la concrétion. Ceci pose évidemment un problème géométrique pour l'utilisation des nuages de points comme moyen de mesure. Pour mieux connaître la nature et l'origine de ces distorsions, nous avons mis en place un protocole expérimental de mesure avant d'entreprendre de telles opérations en milieu naturel.

2 - Mise en place du protocole expérimental

La mise au point du protocole expérimental s'est déroulé en deux temps. Tout d'abord, nous avons cherché à connaître la nature du bruit inclus dans la mesure de la surface topographique d'une concrétion pour vérifier si la trajectoire du laser est déviée ou non. Dans ce cas, toutes les valeurs de positionnement sur la calcite seraient fausses.

Pour cela nous avons disposé, au centre du banc de mesure, une stalagmite de 450 mm de hauteur et d'environ 80 mm de diamètre que nous avons scannée selon quatre positions différentes afin de la relever en totalité. Nous l'avons ensuite recouverte d'une peinture opaque afin de la rendre complètement imperméable à la lumière et nous l'avons de nouveau scannée depuis les quatre stations précédentes, considérant ainsi la surface peinte comme surface de référence, avec laquelle une comparaison des différents nuages de points devient possible. Dans le cadre de ce protocole, nous avons été amenés à mesurer la précision intrinsèque du laserscan, utilisé pour chaque étape de mesure, et la précision topographique lors du recalage des différents nuages de points dans un même référentiel spatial, indispensable à la comparaison des mesures entre elles. Cette précision est de l'ordre de 2 mm, conformément à celle annoncée par le constructeur Leica.

La technique des sphères homologues a été utilisée pour la consolidation et il en résulte un résidu de fermeture de l'ordre de 2 mm. Afin d'appréhender la valeur réelle de la précision, nous avons modélisé un plan (mur de la pièce) que nous avons comparé avec les quatre stations de référence (Figure 2). L'erreur résiduelle réelle, ou l'erreur intrinsèque au matériel de scannérisation, est de l'ordre de 1 mm, ce qui veut dire qu'il est impossible de mesurer des objets ou de déceler des tendances en deçà de cette valeur.

Pour définir la distorsion induite par la calcite sur la mesure laser, nous avons réalisé un certain nombre de mesures directement sur les nuages de points. Des coupes sur le modèle de référence (peint) et sur le modèle brut montrent les différences géométriques entre les deux acquisitions (Figure 3). Sur le profil vertical de la stalagmite, les points correspondant au modèle brut s'écartent progressivement de la topographie de référence, mais cette différence géométrique ne se fait pas de façon linéaire. Les profils horizontaux montrent, de même, le caractère non linéaire de l'erreur de mesure.

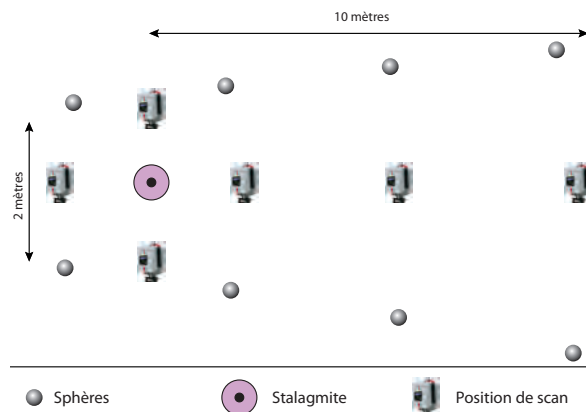


Figure 2 - Schéma du protocole expérimental de mesure mis en œuvre au laboratoire EDYTEM. Les sphères de référence sont disposées de façon à ne pas créer d'ambiguïté pour l'algorithme de calcul des solutions topographiques. La stalagmite est d'abord mesurée depuis toutes les positions à l'état brut puis scannée une seconde fois après application d'une peinture opacifiante.

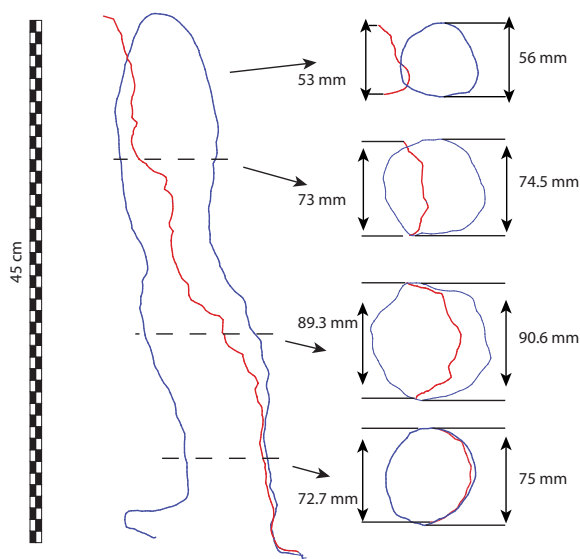


Figure 3 - Le profil en coupe et en plan fait apparaître que la déformation topographique n'est pas uniforme sur l'ensemble de la stalagmite. Cependant la comparaison des mesures de diamètre sur le modèle de calcite (en rouge) par rapport aux diamètres mesurés sur le modèle de référence (en bleu) montre que les proportions morphologiques perpendiculaires à l'axe du scanner sont conservées.

Ensuite, à partir des quatre positions de scanner, nous avons réalisé des mesures de diamètre de la concrétion, perpendiculairement à la normale du relevé. On constate (Figure 4) que le gabarit de la concrétion est conservé dans une fourchette de 1 à 3 mm sur un diamètre s'étendant de 60 à 90 mm. Si la position des points par rapport à l'origine de la mesure semble poser problème, la géométrie du nuage de points semble donc valide.

Pour s'en assurer, nous avons cherché à vérifier si l'erreur de positionnement des points variait avec la distance à laquelle on mesurait l'objet. Pour cela, nous avons scanné la stalagmite (non peinte) à différentes distances (1 m, 5 m et 10 m) le long d'un même axe et sur une même hauteur. Les propriétés géométriques du nuage restent constantes, mais décalées du nuage de référence (Figure 5). La distorsion des mesures n'est pas corrélée à la distance à laquelle la mesure est effectuée.

Par cette expérimentation, nous montrons que le bruit de mesure pourrait être uniquement lié aux propriétés optiques des objets mesurés. Une photographie avec éclairage arrière (Figure 5) montre que la concrétion présente trois faciès différents (associés à trois gammes d'opacité). Les erreurs de mesures (tracé rouge Figure 6) semblent directement associées à ces changements de faciès qui expliqueraient la pénétrabilité du laser dans la calcite et qui induiraient ces déformations géométriques.

Ces différentes mesures expérimentales éclairent la nature du bruit de mesure lié au faciès des objets à mesurer dans l'endokarst. En effet, les cristaux de calcite entraînent la diffraction du rayon laser, retardant ainsi son temps de retour et faussant de manière non négligeable la distance mesurée. La Figure 6 montre, cependant, le caractère hétérogène de cette déformation topographique sur le profil en coupe. L'explication réside dans les propriétés diffractives de l'objet mesuré. La pénétration du laser (lors de la mesure) dans la calcite est variable selon l'opacité de cette calcite. Les conséquences sont géométriques sont un décalage dans le positionnement des points. Cependant, les mesures de gabarit (diamètre notamment) restent conformes dans une fourchette de 3 mm (Figure 4). Il est donc possible d'utiliser ce type de relevés pour des mesures morphologiques de spéléothèmes.

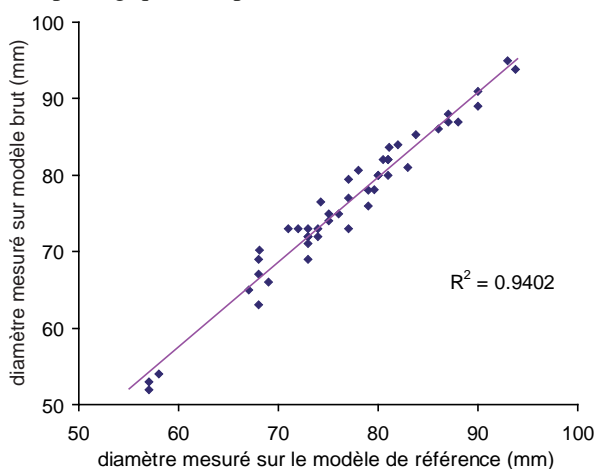


Figure 4 - Relation linéaire existant entre les mesures de diamètre effectuées à la fois sur le modèle 3D scanné sur calcite et sur le modèle 3D de référence scanné sur la stalagmite opaque. Le coefficient de corrélation linéaire passant par l'ensemble du semis de points est de 0,94 montrant que la géométrie générale du nuage est bien conservée.

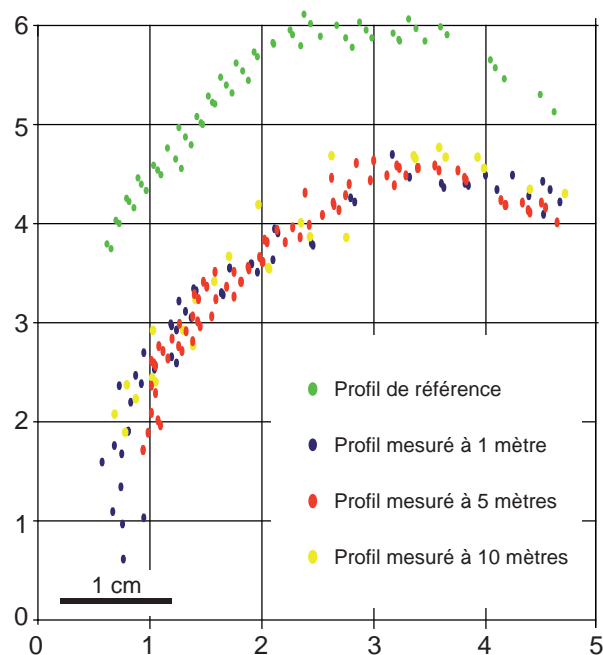


Figure 5 - Comparaison de quatre sections horizontales de la partie sommitale de la stalagmite (vue en plan). L'écart de tous les profils par rapport au modèle de référence est d'environ de 3 cm. Il est constant quelque soit la distance d'acquisition du nuage.

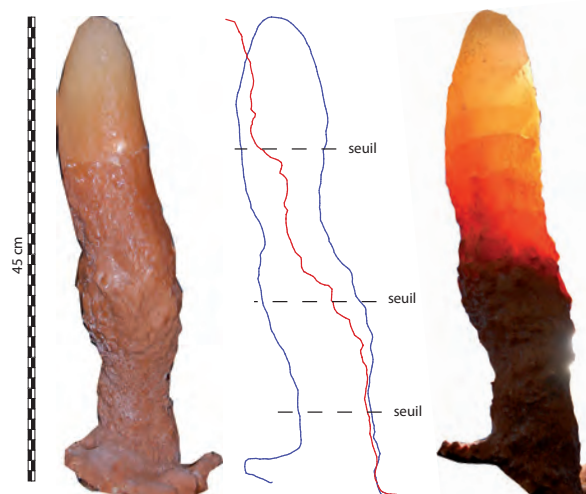


Figure 6 - A gauche, photo prise en lumière ambiante (couleurs naturelles de la concrétion). Au centre, comparaison de deux profils topographiques : en rouge celui correspondant à un relevé lasergrammétrique sur la calcite, en bleu un relevé lasergrammétrique sur le même objet mais recouvert d'une pellicule de peinture opacifiante. A droite, une photographie prise dans le noir avec une source de lumière provenant de l'arrière la diffusion de lumière dans la stalagmite. L'opacité de la calcite mesurée joue un rôle important dans l'erreur de mesure. On identifie ici 3 seuils géométriques entre l'écartement du profil topographique mesuré (en rouge) par rapport au profil de référence (en bleu). Ces seuils semblent corrélés à l'opacité de la calcite plus qu'à sa couleur.

III - LES MESURES EN MILIEU ENDOKARSTIQUE : L'EXEMPLE DE LA GROTTES DE JEITA (LIBAN)

1 - Principes et acquisition de données sur le terrain

Deux cavités ont été retenues lors de la mission de reconnaissance (mars 2010), pour l'évaluation de la probabilité de cassure de spéléothèmes (stalactites et stalagmites) par un (ou plusieurs) séisme(s). Il s'agit des cavités de Jeita et de Kanaan (Nehme *et al.*, 2009) avec, dans chacune de ces grottes, une étude géomorphologique et spéléogénique détaillée.

La mission de terrain, réalisée en octobre 2010, a permis l'acquisition des données *in situ* nécessaires, au moyen d'un lidar Leica HDS 6000, un dôme de 360° par 310°. Cet appareil a une portée de 70 mètres et mesure environ 500 000 points par seconde avec une résolution maximale de 1 mm à une distance 10 m, ce qui représente un pas angulaire de 127 microns entre chaque mesure. Cependant, la précision dans le positionnement de chaque point est annoncée, par le constructeur, à 2 mm en x, y, z jusqu'à 25 mètres.

Le dépouillement des données recueillies devrait permettre un échantillonnage des populations de stalactites cassées et non cassées dans ces deux cavités. Ainsi, pour chacune des deux zones d'étude, il est nécessaire d'extraire des données la population de stalactites non cassées et la population de stalactites cassées afin de quantifier l'accélération probable des ondes sismiques expliquant la rupture (Figure 7).

L'accélération est calculée selon une méthode statistique qui requiert, pour chaque concrétion, la mesure

de sa longueur et plusieurs mesures de diamètre depuis l'accroche jusqu'à l'extrémité ; pour les concrétions brisées, une estimation de leur longueur originelle est nécessaire (Lacave *et al.*, 1999, 2003, 2004).

L'évaluation de cette longueur pourra être réalisée à partir de la modélisation en 3D de la concrétion à partir du nuage de points dense.

Par la suite, l'objectif est de pouvoir déterminer la période de temps à laquelle la probabilité d'accélération atteinte pourra être attribuée. Pour cela, des prélèvements de calcite au niveau d'une repousse de brisure (Photo 1) seront réalisés afin de caler cette reprise du concrétionnement dans le temps (datation).

La méthodologie utilisée sur le terrain est conforme au protocole de mesure élaboré en laboratoire. Dans la grotte de Jeita (Photo 2), 49 positions de scanner ont été nécessaires pour couvrir l'intégralité de la zone d'étude avec des densités de points choisies en fonction de la distance entre le scanner et les plafonds où se situent les stalactites. La consolidation des scènes repose sur la technique des sphères homologues permettant une fermeture topographique de 3 mm, restant ainsi dans la marge d'erreur du cahier des charges initial. L'horizontalité et l'orientation ont été assurées par un géoréférencement au compas électronique (Photo 1) et un compensateur intégré au scanner.

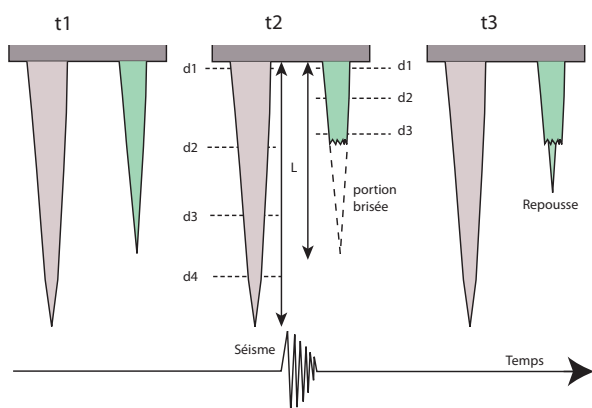


Figure 7 - Schéma illustrant la brisure d'un spéléothème. Le t1 correspond à l'instant avant le séisme. Les concrétions sont en place. Le t2 correspond à la phase co-sismique, pendant laquelle les spéléothèmes sont soumis à une certaine accélération du sol ou du plafond. A ce moment là, si l'accélération dépasse le seuil de résistance des concrétions, alors ces dernières se brisent. Le t3 correspond à la période post-séisme : avec ici une repousse de la concrétion. Les traits en pointillés illustrent les mesures de géométrie des spéléothèmes qu'il faudra réaliser sur le modèle 3D pour le traitement statistique.

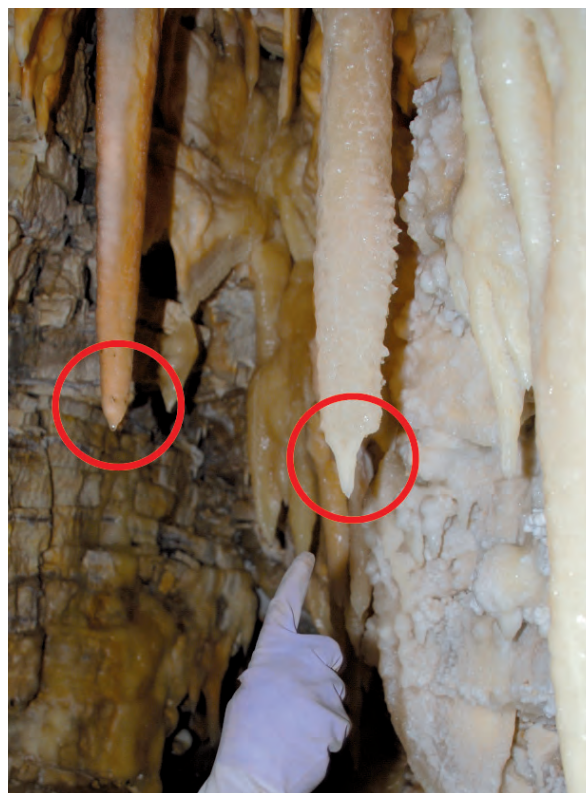


Photo 1 - Repousses de stalactites suite à une brisure (entourée ici en rouge ; photo Benjamin Sadier).



Photo 2 - Acquisition lasergrammétrique du modèle 3D des spéléothèmes dans la grotte de Jeita. Un scanner HDS 6000 est ici mis en œuvre (à droite). Des sphères servent à la consolidation des scènes et un référencement local est réalisé avec un compas électronique couplé à un distance-mètre (à gauche) (Photo Stéphane Jaillet).

2 - Traitement des données et restitution

Ce traitement nécessite des mesures de la longueur et du diamètre de la concrétion, réalisées par un opérateur, à l'écran. Ce travail reste fastidieux et il n'est jamais aisé de manipuler de lourds nuages de points. D'une part, parce que la masse de données brutes est extrêmement importante, nécessitant des stations de travail dédiées, et d'autre part, parce que l'apprentissage des logiciels de rétro ingénierie peut s'avérer long. C'est pourquoi nous avons choisi ici de travailler à partir d'images solides. De telles images sont, en fait, des images 2D construites à partir de la projection de tous les points selon un plan que l'on détermine à l'avance. Ainsi, une scène 3D peut être entièrement projetée sur un cube et développée ensuite à plat. Il en résulte, dans le cas étudié ici, des images à très haute densité de pixels, avec

pour chacune une position (x, y, z). La résolution de ces images dépend de la quantité de points acquis sur le terrain. Ici, nous avons scanné l'ensemble du terrain pour qu'au final, le modèle soit résolu d'un point tous les 3 mm. Pour cela, nous avons conservé 37 scènes sur lesquelles la totalité des points a été gardée, ce qui représente des scènes constituées de 75 à 175 millions de points. Ainsi, le nuage de points global comporte, au total, plus de 3,3 milliards de points.

Dès lors, il devient possible d'effectuer directement des mesures sur des images (Figure 8) tout en naviguant aisément dans le modèle 3D. Ce type de restitution offre une appropriation immédiate du nuage de points tout en conservant les multiples possibilités par l'utilisation de ce type de support. On peut donc réaliser des mesures (Figure 8) exportables vers un tableur pour les futurs traitements statistiques.

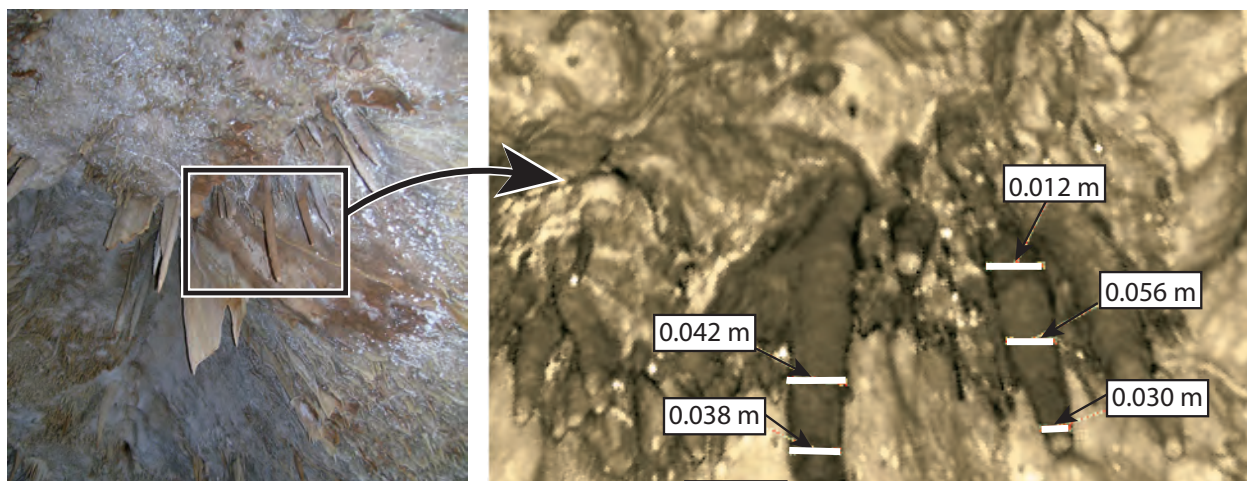


Figure 8 - Extrait d'une image solide sur laquelle on effectue directement les mesures de gabarit (à droite). L'image de gauche est un cliché photographique du même secteur, pris directement sur le terrain.

CONCLUSION

L'utilisation du lidar pour la mesure de spéléothèmes s'est avérée pertinente pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il offre une grande précision, malgré un bruit induit par le type de matériau mesuré. La densité de la mesure, dans les trois dimensions, apporte une justesse et un confort d'utilisation bien supérieurs à l'utilisation des photographies numériques jadis utilisées. De plus, l'exhaustivité de la mesure est un atout majeur. En effet, le retour d'expérience montre que l'on voit plus de concrétions que sur le terrain où les conditions d'observations ne sont pas toujours faciles (éclairage, distance, etc.).

Ce travail renseigne, tout d'abord, sur (i) le comportement du laser rouge visible à une certaine longueur d'onde sur de la calcite, et sur (ii) l'impact de ce matériau sur la géométrie des nuages de points restitués. Il ouvre, également, des perspectives intéressantes et pour certaines inattendues. En effet, bien que tous les essais n'aient pas été décrits dans cet article, il semblerait que l'état de surface des objets mesurés, ou même leur structure interne concernant des objets composés de calcite, puisse être qualifiés au travers du bruit induit par le type de matériau relevé ou même son humidité.

Cela ouvre une perspective intéressante dans l'étude de la structure interne des stalagmites et des stalactites sans passer par une analyse destructive.

Dans le cadre du présent travail, la qualification du bruit en erreur de positionnement et non en erreur géométrique, rend valable et pertinente la mesure de spéléothèmes par laser scanning. Il est effectivement possible de qualifier les caractéristiques géométriques des différents objets investigués et d'en tirer une analyse statistique. De plus, l'exhaustivité de la mesure, grâce au « clonage numérique » de cavités permet d'atteindre une certaine complétude et annule l'inaccessibilité de certains objets sur le terrain. Ceci rend le comptage et l'auscultation des spéléothèmes plus statistiquement meilleur. Tous peuvent être potentiellement être mesurés. Cette méthodologie, développée ici, sera dans le cadre de ce programme de recherche appliqué à plusieurs stalactites dans un premier temps et étendue à plusieurs cavités du Liban dans un second temps. L'objectif à moyen terme est le traitement statistique des données acquises et *in fine* une contribution originale à une meilleure connaissance de la paléo-sismicité du secteur.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBRASEYS N.-N., BARANGAZI M., 1989. The 1759 earthquake in the Bekaa valley : implications for earthquakes hazard assessment in the Eastern Mediterranean region. *Journal of Geophysical research*, 94, 4007-4013.
- AMBRASEYS N.-N., MELVILLE C. P., 1988. An analysis of the Eastern Mediterranean earthquake of 20 may 1202. History of seismography and earthquake of the world, San Diego, 181-200.
- BECKER A., COLIN A. D., URS E., GILLI E., JEANNIN P.-Y., LACAVE C., 2006. Speleoseismology : a critical review. *Journal of Seismology*, 10, 371 - 388.
- DAËRON M., KLINGER Y., TAPPONNIER P., ELIAS A., JACQUES E., SURSOCK A., 2005. Sources of the large A.D. 1202 and 1759 Near East earthquakes. *Geology*, 33, 7, 529-532.
- DAËRON M., KLINGER Y., TAPPONNIER P., ELIAS A., JACQUES E., SURSOCK A., 2007. 12.000 Year long record of 10 to 13 paleoearthquakes on the Yammouneh fault, Levant fault System, Lebanon. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 3, 749-771.
- DARAWCHEH R., SBEINATI M., MARGOTTINI C., PAOLINI S., 2000. The 9 july A.D. 551 Beirut earthquake, Eastern mediterranean region. *Journal of Earthquake engineering*, 4, 4, 403-414.
- DELANNOY J.-J., 1997. Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst, Thèse Etat, Université de Grenoble I, 678 p.
- GILLI E., LEVRET A., SOLLOGOUD P., DELANGE P., 1999. Research on the february 18, 1996 earthquake in the caves of Saint Paul de Fenouillet area (eastern Pyrénées, France). *Geodinamica Acta*, 12, 143-158.
- LACAVE C., LEVRET A., KOLLER M., 2000. Measurement of natural frequencies and damping of speleothems. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New-Zealand. Paper 2118.
- LACAVE C., 2001. Traversée de la grotte de Milandre. *Spéleo*, 31, 14-17.
- LACAVE C., EGOZCUE J.-J., KOLLER M.-G., 2002. Can broken - and unbroken - speleothem tell us something about seismic history ? 12th European Conference on Earthquake Engineering, London. Paper 349.
- LACAVE C., KOLLER M.-G., EICHENBERGER U., JEANNIN P.-Y., 2003. Prevention of speleothem rupture during nearby construction. *Environmental Geology*, 43, 892-900.
- LACAVE C., KOLLER M.-G., EGOZCUE J.-J., 2004. What can be concluded about seismic history from broken and unbroken speleothems ? *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 3, 431-455.
- NADER F.H., VERHEYDEN S., CHENG H., SWENNEN R., 2007. Etude pétrographique et géochimique d'une stalagmite de la grotte de Jeita (Liban). *Lebanese Science Journal*, 8, 2, 2007, 45-58.
- NEHME C., JABBOUR-GÉDÉON B., GÉRARD P.-C., SADIÉ B., DELANNOY J.-J., 2009. Reconstitution spéléogénique de la grotte de Kanaan (Antélias, Liban) : contribution à la morphogénèse du nahr Antelias. *Karstologia*, 54, 21-30.

IDENTIFICATION ET EXTRACTION PAR SEGMENTATION DE SPÉLÉOTHEMES DE L'AVEN D'ORGNAC ARDÈCHE, FRANCE

IDENTIFICATION AND EXTRACTION BY SEGMENTATION OF SPELEOTHEMS OF ORGNAC ARDÈCHE, FRANCE

SOUHAIL HAJRI¹, BENJAMIN SADIÉ^{1,2}, STÉPHANE JAILLET¹,
MATTHIEU THOMAS¹, JEAN-JACQUES DELANNOY¹

¹ Laboratoire Edytem, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

² Cabinet Perazio, 137 rue du Mayoussard, 38430 Moirans, France.

RÉSUMÉ

L'analyse d'une forêt de stalagmites de l'aven d'Orgnac a été rendue possible par un relevé lasergrammétrique sans contact, en grotte. Le nuage de points, maillé à un pas de 15 mm environ a ensuite été traité selon deux méthodes de segmentation. L'une par LPE (ligne de partage des eaux), permettant l'extraction de régions en utilisant la courbure comme primitive discriminante ; l'utilisation de marqueurs manuels rend la méthode plus efficace et limite la sur-segmentation. La seconde méthode est basée sur l'ajustement d'ellipses successives à partir de points extraits depuis le modèle, sur un plan mobile selon l'axe Z. Au final, ces méthodes permettent d'atteindre une certaine complétude dans l'analyse de l'objet souterrain tout en assurant correctement sa conservation en limitant au maximum les temps de séjour sur place.

MOTS-CLÉS : MODÈLE RTI, SEGMENTATION, SPÉLÉOTHÈME, ORGNAC.

ABSTRACT

The analysis of a forest of stalagmites in Orgnac cave was made possible by lidar measurement. The cloud of points was transform in a TIN model with a spacing of 15 mm and was then treated by two methods of segmentation. One by LPE (watershed approach), allowed the extraction of regions using the curvature as a criteria. The use of markers manuals makes the method more efficient and can limit the over-segmentation. The second method is based on the fit of successive ellipses from points extracted from the TIN model on a moving plane along the Z axis. Ultimately, these methods can achieve the completeness in the analysis of the speleothems while ensuring their proper preservation by minimizing the residence time on site.

KEYWORDS: TIN MODEL, SEGMENTATION, WATERSHED APPROACH, SPELEOTHEM, ORGNAC.

INTRODUCTION

Les recherches menées depuis plusieurs années sur les spéléothèmes (stalagmites notamment) ont largement montré l'intérêt que pouvait revêtir cet objet emblématique du karst souterrain dans les reconstitutions environnementales (Baker *et al.*, 2008 ; Couchoud, 2008). Il est par exemple possible de reconstituer des changements d'ordre climatique ou d'occupation du milieu. Cependant, toutes ces études sont basées sur des prélèvements d'échantillon et des analyses destructives. Dans des cavités à forte valeur patrimoniale ou simplement dans des cavités où les stalagmites sont peu nombreuses, ces prélèvements ne sont pas toujours possibles ou restent compliqués.

L'apparition récente des lidars terrestres ouvre une approche nouvelle dans ce type d'étude en autorisant une acquisition rapide de nuages de points denses sans contact avec les objets investigués. Il s'agit donc *in fine* d'analyser la morphologie externe des stalagmites, en partie conditionnée par la structure interne (Perrette, 2000). Le temps de séjour dans la cavité est limité à la phase d'acquisition des données et une certaine exhaustivité peut être recherchée pour un travail mené à l'échelle de plusieurs stalagmites et non plus

d'une seule. De fait, il devient possible, sans impacter le milieu, de mener une grande partie du travail en « post-traitement » et de réaliser ainsi de nombreux tests et études avant d'envisager un retour sur le terrain. Cependant, la masse des données à traiter n'en est que plus importante. Des fichiers de plusieurs millions de points sont souvent générés et imposent le recours à des suites logicielles spécifiques. Plusieurs d'entre elles, dans le domaine de la retro-ingénierie sont assez bien adaptées à ce type d'étude (*Polyworks*®, *Realworks*®, *3DReshaper*®, *MeshLab*®), mais pour certaines extractions et analyses spécifiques, nous avons dû développer nos propres outils d'inspection.

L'objectif de cet article est de montrer comment à partir de l'exemple d'une forêt de stalagmites scannée dans le réseau d'Orgnac (Ardèche), nous avons développé des outils de segmentation 3D afin de proposer une cartographie automatique du site et des traitements statistiques des données géométriques obtenues à partir du modèle 3D. Après une présentation brève du site et de l'acquisition du modèle numérique, nous présentons deux méthodes d'extraction, l'une par région et l'autre par plan mobile.

I - ACQUISITION DE LA SCÈNE 3D

Le site d'étude retenu est une portion de la salle 1 d'Orgnac II où une forêt de stalagmites se situe en bordure du cheminement mis en place pour les visites spéléologiques réglementées. Le nuage de points a été acquis avec un scanner Leica HDS 6000. La mesure est basée sur le décalage de phase (précision de mesure inframillimétrique) et la fenêtre de travail est un dôme

de $360^\circ \times +90^\circ/-65^\circ$. Quatre positions de scan ont permis de limiter les masques. Un nuage de points dense, au pas infracentimétrique, est alors généré (Figure 1). Des sphères de géo-référencement positionnées dans la scène (Photo 1) ont été scannées à très haute résolution afin de procéder à un ajustement et à un alignement des nuages de points selon les centroïdes de ces sphères.

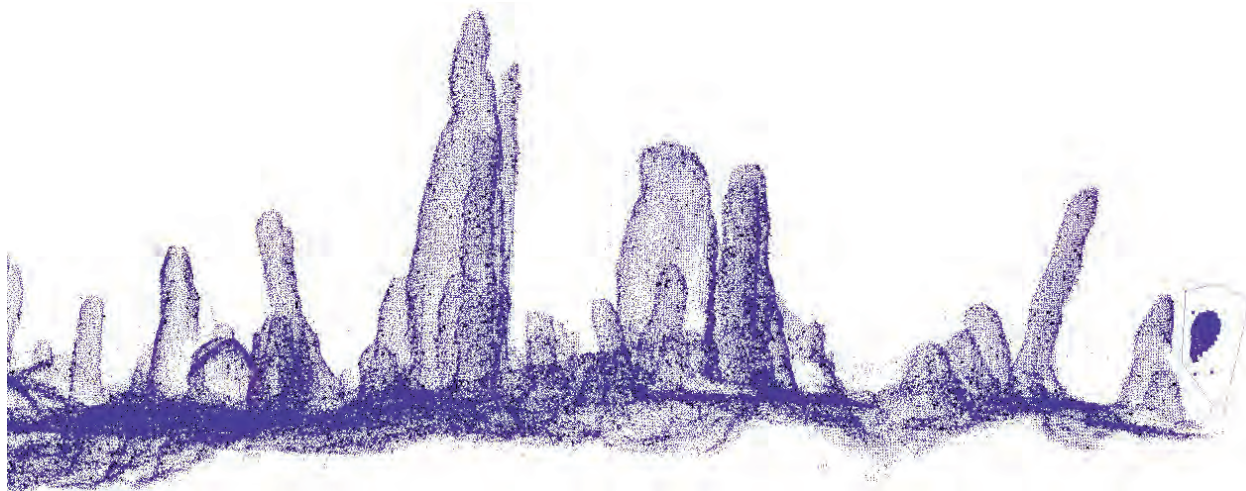


Figure 1 - Vue 3D du nuage de points brut, assemblé à partir des quatre positions de scans. Quelques points aberrants sont filtrés ou nettoyés à la main, avant l'étape du maillage.



Photo 1 - Acquisition du nuage de points sur le terrain par lasergrammétrie (ici un scanner Leica HDS 6000) et référencement local avec une station totale. Les sphères colorées (en bas à droite) servent à la consolidation des nuages entre eux.

L'ensemble de ces traitements a été réalisé en partie sous *Cyclone*®, puis sous *Realworks*®. Seule la partie centrale de la forêt de stalagmites proprement dite, soit un espace de 72 m², a été conservée pour la suite de l'étude.

Il subsiste fréquemment quelques points aberrants dans la scène, liés à des problèmes de réflexion ou à des effets de bord (voile de mariée par exemple qui sont la marque des points mal positionnés, car tangents aux objets scannés). Ces points sont dans un premier temps éliminés « à la main ». Un processus de filtrage permet ensuite (i) d'éliminer les points redondants (liés à ces recouvrements des scènes de scan), (ii) d'uniformiser la densité du nuage de points par ré-échantillonnage, (iii) de lisser le nuage de points afin de diminuer les rugosités liées au bruit de mesure. Des fonctions de filtrage sont offertes par *Polyworks*® et *3DReshaper*®, les deux logiciels de retro-ingénierie que nous utilisons fréquemment. Différents traitements s'appliquent aux données 3D brutes (Curless, 1999 ; Girod *et al.*, 2000 ; Boehler *et al.*, 2002). Ce nettoyage par filtrage automatique consiste à supprimer les points trop loin de la surface théorique (filtrage des points par rapport aux points voisins).

La suite des traitements consiste à mailler le nuage de points pour obtenir un modèle RTI (Réseau Triangulaire Irrégulier). Le modèle RTI (moins dense que le nuage de points) apporte une information de voisinage à chaque sommet créé, tout en conservant le même niveau d'information morphologique. Cette topologie est fondamentale pour la suite des traitements, notamment l'identification des ruptures morphologiques ou les opérations de segmentation. On passe ainsi d'une information ponctuelle (le point) à une information surfacique (la peau) augmentant ainsi le potentiel d'information. Il convient encore de vérifier la conformité du modèle, c'est-à-dire s'assurer qu'il ne comporte aucune erreur de topologie ou autres discontinuités dans le modèle triangulé. Une conformité peu satisfaisante génère

systématiquement des erreurs dans les algorithmes de traitement de surface. C'est le cas des algorithmes de segmentation (Hajri, 2010). Lors de la triangulation, des faces anormales sont fréquemment générées. Il peut s'agir (i) de faces non-manifold si une arête appartient à trois (ou plus) facettes ; (ii) de faces croisées si les arêtes d'une facette traversent une autre facette ; (iii) de faces redondantes si le nombre d'arêtes et de faces qui appartiennent à un même sommet doit être identique ; (iv) de faces allongées (pics) si une facette allongée peut être identifiée en fonction de plusieurs critères : longueur d'arête, rapport base / hauteur, rapport arête maximale / arête minimale... ; (v) de faces instables (inversées) si une facette est instable lorsque sa normale présente une incohérence par rapport aux autres facettes. Ces erreurs peuvent être dues à un filtrage insuffisant du bruit ou à des paramètres de triangulation incorrects ayant pour conséquence la création d'arêtes entre des sommets ne devant pas être reliés.

Pour vérifier et corriger ces incohérences dans le modèle RTI, *Polyworks*® a été utilisé et plus précisément le module *IMedit*. Au final après tous ces nettoyages, d'un nuage de 8 millions de points, on obtient un modèle RTI de 800 000 triangles (Figure 2) dont la maille moyenne, de l'ordre de 15 mm, est suffisante pour la suite de l'analyse : ici l'extraction de stalagmites d'une dizaine de centimètres de section et de moins d'un mètre de hauteur.

Afin d'identifier ces différentes stalagmites, une étape de segmentation du modèle RTI est nécessaire. C'est l'étape la plus importante du processus de reconnaissance des formes.

Elle consiste à partitionner le modèle RTI en zones homogènes au regard d'un critère. Dans notre cas, ce critère sera la courbure en un point du maillage. Cette dernière correspond à la primitive la plus utilisée sur les maillages comme un indicateur géométrique très important permettant de mieux apprécier la forme locale d'une surface en tout point.

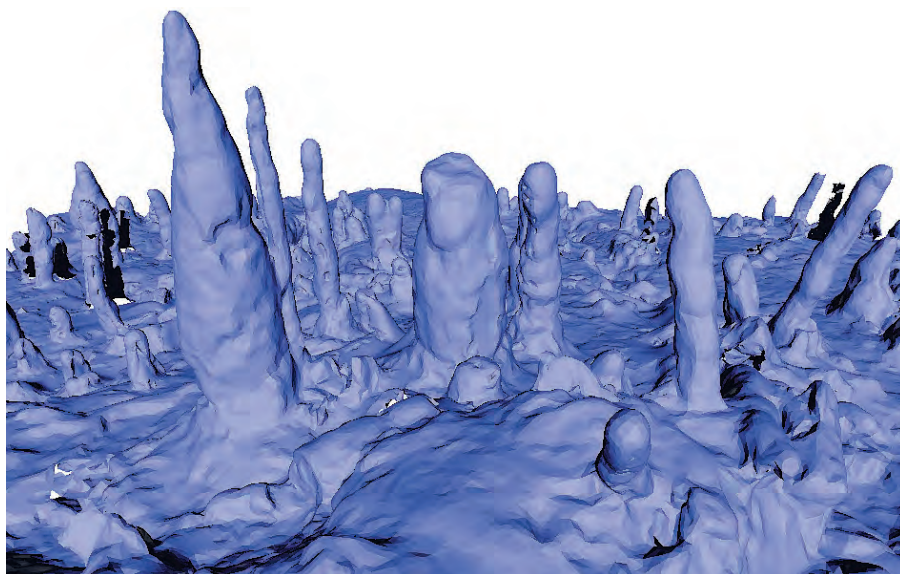


Figure 2 - Vue 3D du modèle RTI des stalagmites de la forêt d'Ornac. La maille est de 15 mm environ.

Dans la suite, nous proposons deux méthodes d'identification différentes :

- une première approche, dite méthode d'extraction par région, de segmentation semi-automatique destinée à extraire toutes les stalagmites pertinentes dans un contexte d'interaction « homme-machine »

où l'opérateur apportera les informations nécessaires à l'algorithme par un pointage par clic sur les formes à extraire du modèle 3D ;

- une deuxième approche originale d'analyse automatique des morphologies des stalagmites, basée sur un « plan mobile » pour leur extraction.

II - MÉTHODE D'EXTRACTION PAR RÉGION

Cette première méthode est basée sur l'algorithme des lignes de partage des eaux (LPE), classé parmi les techniques de segmentation les plus rapides et les plus robustes.

La LPE a été étudiée de manière extensive dès le 19^e siècle par Jordan (1872). Un siècle plus tard elle a été introduite par Digabel et Lantuéjoul (1978) et Beucher et Lantuéjoul (1979) pour la segmentation d'image 2D et elle est maintenant utilisée comme une étape fondamentale dans de nombreuses procédures de segmentation d'image.

L'approche de segmentation par LPE est basée sur l'analogie entre une image et une surface topographique (Figure 3). Ce relief comporte un certain nombre de structures topographiques (*i.e.* dômes, vallées, lignes de crêtes) qui sont utiles pour décrire le contenu de l'image. Le niveau de gris d'un pixel de l'image 2D ou bien la courbure d'une image 3D (modèle RTI) sont interprétés comme des altitudes (*z*) dans un relief topographique.

Il existe deux stratégies courantes pour déterminer les lignes de partage des eaux d'une image en général : approche descendante et approche ascendante. Dans notre étude, nous ne nous intéressons qu'à l'approche ascendante qui a donné naissance à plusieurs algorithmes plus efficaces que ceux de l'approche descendante (Vincent et Soille, 1991 ;

Meyer, 1991 ; Beucher, 2004). Son principe est basé sur un processus d'immersion ou d'inondation de l'image à partir des *minima* ou des marqueurs du relief. Lorsque deux bassins versants se rejoignent et risquent de se mélanger, on construit une digue. Le terme de digue s'entend ici comme la séparation construite entre deux zones d'une image correspondant à deux « bassins versants » différents. Ce terme est aisé à comprendre en 1D ou en 2D mais ne peut pas être représenté en 3D. Une fois que le relief est totalement immergé, les digues ainsi for-

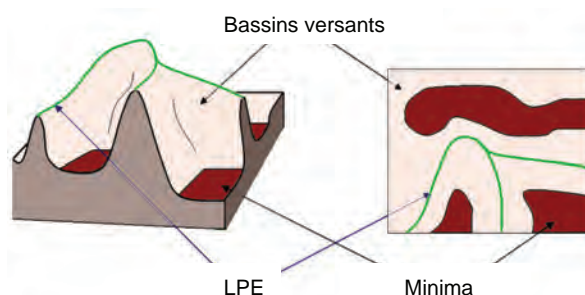


Figure 3 - Principe de la segmentation par LPE (lignes de partage des eaux). La méthode permet de délimiter les « bassins versants » d'une image, à partir d'une information « Z » qui peut être la courbure.

mées constituent les lignes de partage des eaux. L'exemple monodimensionnel de la Figure 4 illustre le principe de la LPE par immersion.

La méthode LPE a cependant un défaut, celui de générer une sur-segmentation qui peut être importante en raison du bruit du modèle (Figure 5). Celui-ci entraîne, en effet, la présence de nombreux minima régionaux qui constituent autant de zones segmentées.

Pour résoudre ce problème de sur-segmentation nous avons choisi d'utiliser la LPE par marqueurs. Ces marqueurs vont permettre d'imposer la présence de certains bassins versants pour contraindre la topologie de la LPE. La Figure 6 décrit le principe de segmentation par LPE à partir des marqueurs. Le nombre de régions correspond au nombre de sources d'inondation. Dans l'exemple de la Figure 6, les marqueurs représentent deux bassins versant (deux régions).

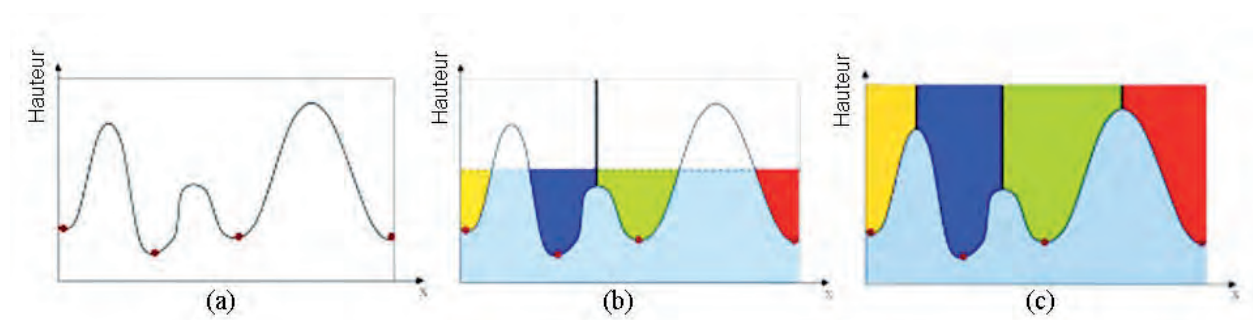


Figure 4 - Illustration monodimensionnelle du principe d'immersion pour la segmentation par ligne de partage des eaux : a) signal d'entrée représentant une ligne d'une image composée de points (pixels) et dont l'intensité des niveaux de gris correspond à la hauteur de points (les minima locaux sont indiqués par les points rouges) ; b) processus ascendant d'inondation à partir de chaque minimum local (lorsque deux bassins se rencontrent un barrage est construit pour éviter le mélange, ces barrages sont les contours finaux de la segmentation) ; c) résultat de la segmentation du signal initial (4 régions).

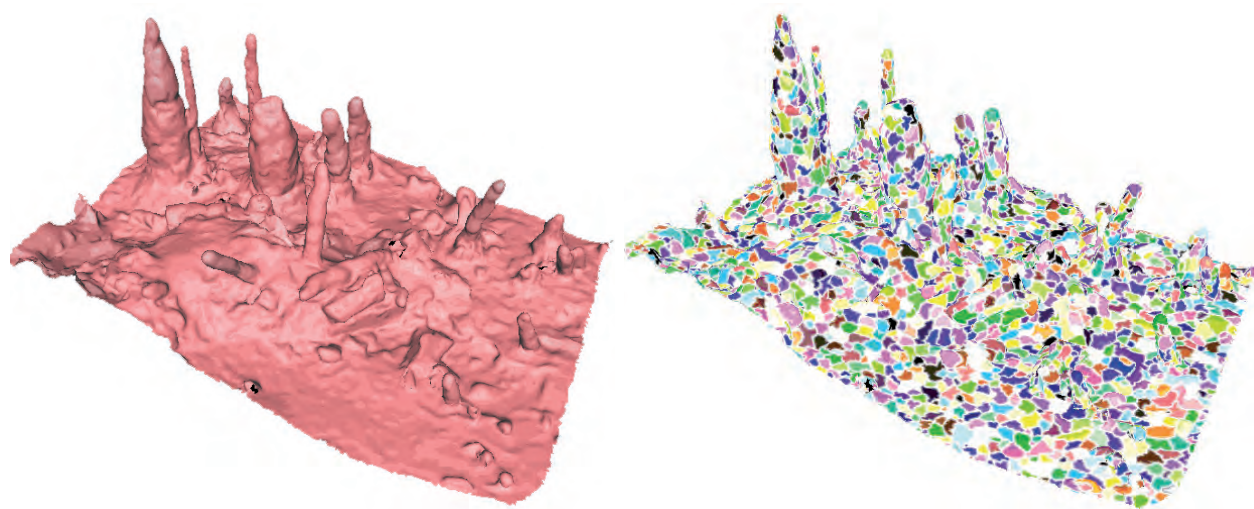


Figure 5 - Résultats de la LPE : à gauche le modèle RTI 3D représentant une partie de la forêt de la salle 1 d'Ornac II. À droite sa segmentation (une couleur par région) par LPE basée sur le critère « courbure ».

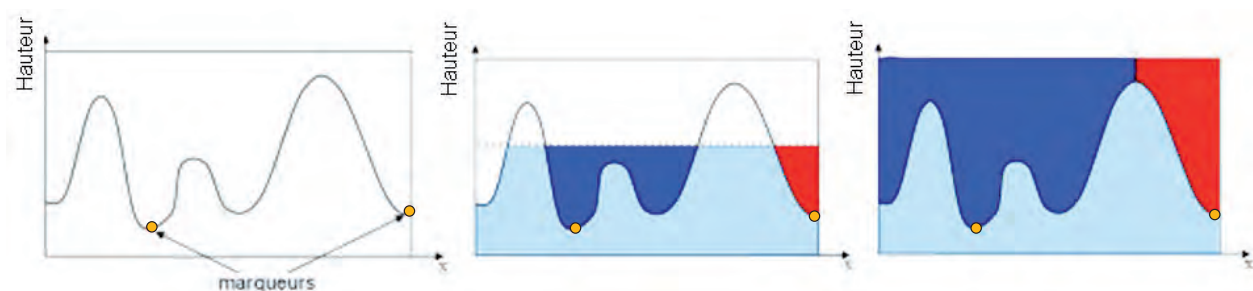


Figure 6 - Le principe de LPE avec marqueurs. Les minima locaux sont choisis par l'opérateur. Ils sont indiqués par les points orange.

La LPE par marqueurs manuels paraît bien adaptée à nos modèles RTI présentant des formes naturelles complexes qui nécessitent, à un certain moment l'intervention de l'utilisateur pour guider le processus de segmentation (Figure 7). Cette solution consiste à positionner quelques marqueurs, qui correspondent à des vertex du modèle RTI, dans les stalagmites à extraire. Cette méthode fournit des caractéristiques très intéressantes en termes de qualité de segmentation, de robustesse et de temps de calcul, Figure 8. Son principal avantage est qu'elle ne nécessite aucun autre paramètre en plus des points d'amorçage (les marqueurs). Elle n'utilise notamment aucun seuillage. Le recours à

ce procédé semi-automatique de segmentation permet d'identifier les stalagmites, de manière directe grâce aux connaissances à priori apportées par l'opérateur.

Cependant, cette stratégie basée sur la LPE par marquage des stalagmites se révèle complexe à réaliser quand il s'agit de l'extraction d'un nombre important d'objets, où le marquage manuel de ces stalagmites (parfois, jusqu'à quelques centaines de stalagmites) devient une tâche fastidieuse.

C'est pourquoi, une nouvelle approche est proposée. Elle est conçue pour identifier d'une manière automatique l'objet stalagmite.

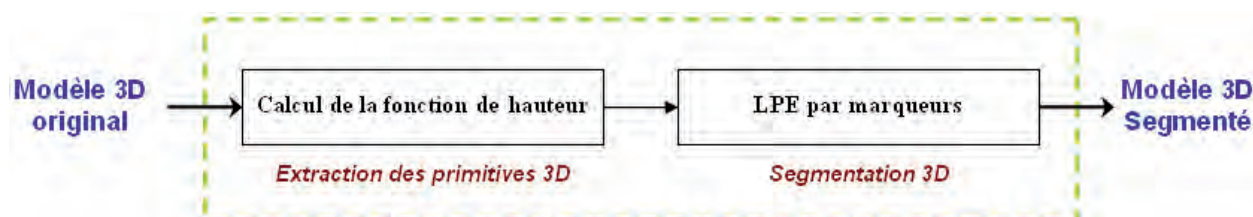


Figure 7 - Le processus de segmentation interactive.

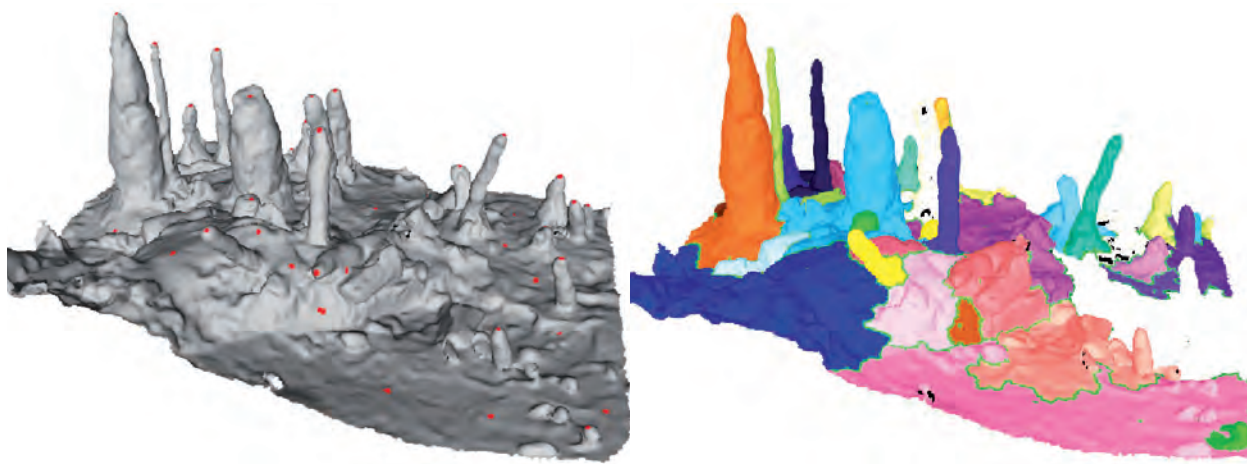


Figure 8 - Résultat de la LPE sans marqueur sur une partie de la forêt de stalagmite de la salle 1 d'Orgnac II.

III - MÉTHODE D'EXTRACTION PAR « PLAN MOBILE »

L'identification et la caractérisation des stalagmites, par cette deuxième approche, consiste à extraire les points du maillage (modèle RTI) 3D qui se trouvent sur les stalagmites du reste de la scène d'une part et à produire des modèles des concrétions d'autre part. Ce dernier point est basé sur l'ajustement de primitives géométriques, ici l'ellipse. En effet, la méthode est basée sur l'hypothèse qu'une stalagmite peut être modélisée par une suite d'ellipses superposées suivant

l'altitude (Z) (Figure 9). Il eût été possible de choisir le cercle comme s'approchant au mieux de la section d'une stalagmite mais c'était perdre une part de l'information, notamment celle du caractère aplati de cette section.

A ce stade, le problème de l'extraction des stalagmites devient alors un problème d'extraction des classes de points 3D de formes elliptiques obtenues par intersections de plans horizontaux avec le modèle 3D

Figure 9 - Modèle RTI d'une stalagmite et son approximation par une suite d'ellipses. On identifie en coupe développée et en plan le déplacement de l'axe de croissance de la stalagmite au cours de son édification.

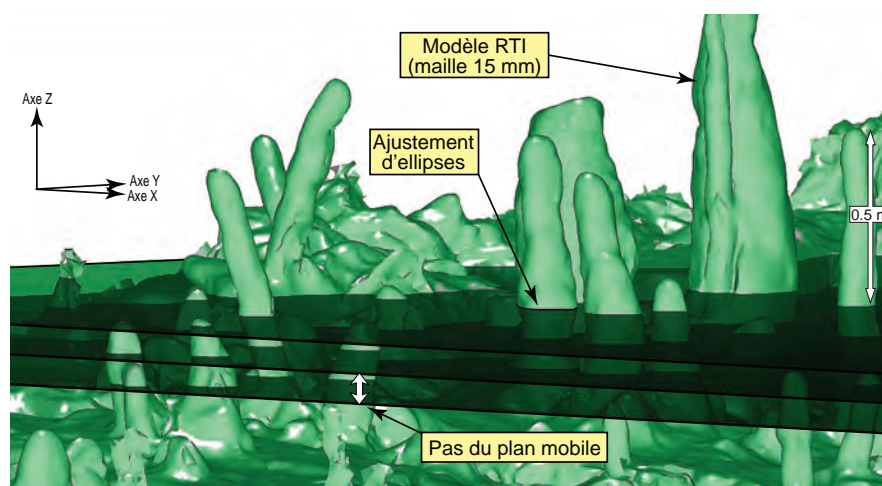
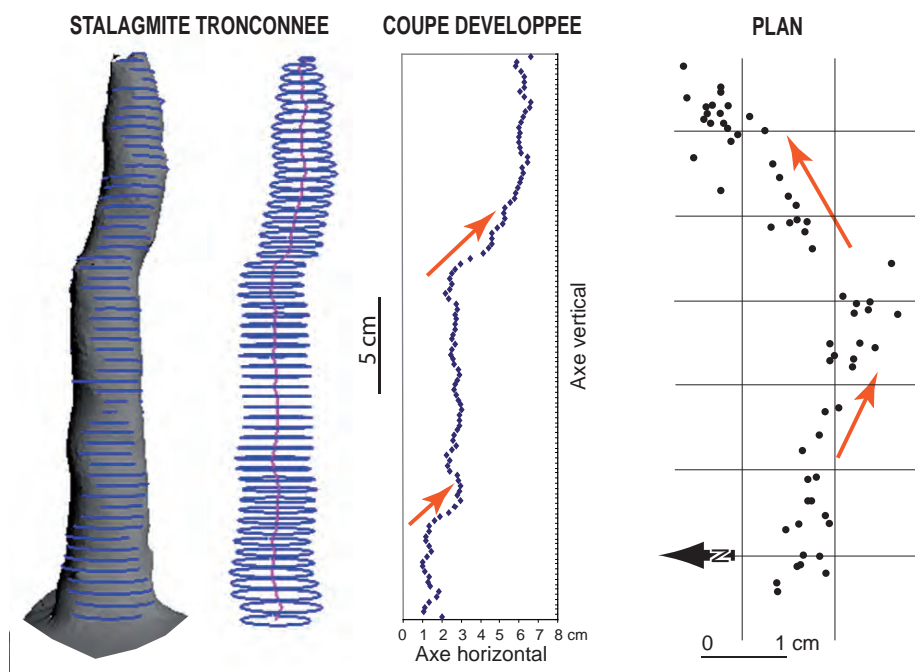


Figure 10 - Mise en œuvre de la méthode du plan mobile. Le déplacement du plan selon l'axe Z permet d'extraire des points sur le modèle RTI. L'ajustement d'ellipses successives sur ces points permet d'extraire automatiquement les stalagmites.

de la scène (Figure 10), d'où son appellation de plan mobile (Hajri et al., 2009).

Trois étapes sont appliquées à chaque plan (section) d'intersection. Pour chaque section S_i , un ensemble de données 3D contenant tous les points du modèle RTI ayant des altitudes comprises entre Z_i et $Z_i - h \cdot e$ est défini (i = numéro d'ordre du plan, h compris entre 1 et 3, e = maille moyenne du modèle RTI). Nous considérons donc que le plan de travail « possède » une certaine épaisseur ε égale à $h \cdot e$ et qu'il recoupe les sommets du modèle RTI.

Une première étape (Figure 11) basée sur l'algorithme de classification automatique DBSCAN (Ester et al., 1996), permet l'identification des clusters, de points 3D, denses et de formes arbitraires présentes dans une section S_i . Une deuxième étape a pour but de ne garder que les clusters de formes elliptiques. L'identification et la caractérisation de ces clusters elliptiques se fait par la méthode de Fitzgibbon et al. (1999) d'ajustement

d'ellipses. Ceci consiste à ajuster au mieux un modèle, ici la primitive géométrique ellipse, sur des données 2D (projection orthogonale des coordonnées 3D des vertex du modèle RTI sur le plan d'intersection XY). Enfin, une dernière étape affecte les clusters elliptiques aux stalagmites correspondantes et traite les cas de fusion entre stalagmites. Les clusters sont ajoutés à une liste selon un critère de distance entre les centres des ellipses ajustées (section i) et celles traitées lors de l'extraction précédente (section $i-1$). La section $i+1$ est alors traitée selon le même procédé (Figure 11).

L'ajustement de la primitive ellipse, par la méthode de Fitzgibbon et al. (1999), joue donc un rôle central au niveau de la méthode développée. En particulier, l'une des originalités de notre approche du *plan mobile* est de faire intervenir l'ajustement de la primitive géométrique au sein même du procédé d'extraction des stalagmites, sans pré-segmentation. Ce procédé est totalement automatique quoique le résultat dépende fortement des

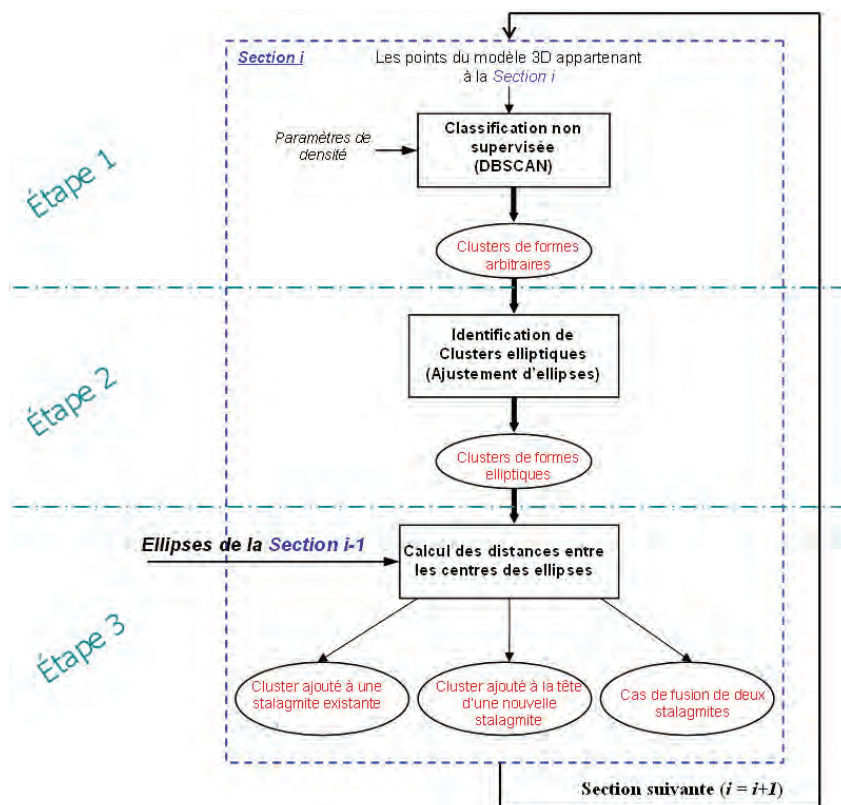


Figure 11 - Les principales étapes de la méthode du « plan mobile ».

paramètres d'entrée de la méthode. L'utilisateur doit fixer, suivant le modèle RTI à segmenter et l'étude envisagée, les valeurs adéquates de ces paramètres (le pas du plan mobile, l'épaisseur du plan, c'est-à-dire la distance de part et d'autre de ce plan et la distance entre deux stalagmites). Ces valeurs sont fixées en fonction de e , la maille moyenne du modèle RTI. Les Figures 12 et 13 donnent un aperçu des résultats de segmentation par la méthode de plan mobile sur l'exemple de la forêt de stalagmites d'Orgnac. Noter la robustesse de la méthode qui extrait la totalité des spéléothèmes sans problème de sur-segmentation. Les paramètres, qui sont fixés à un pas de e (maille moyenne du modèle RTI) et une épaisseur limitée ($\pm 1,5 * e$), assurent l'extraction de 134 stalagmites.

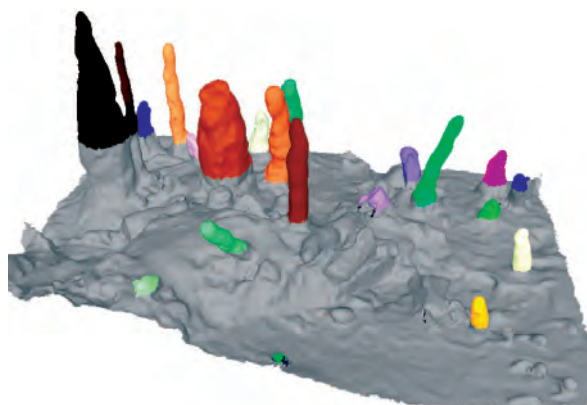


Figure 12 - Exemple de résultat d'extraction d'une partie de la forêt de stalagmites. Noter les stalagmites droites et basculées, bien extraites du modèle et les stalagmites tombées au sol, non extraites.

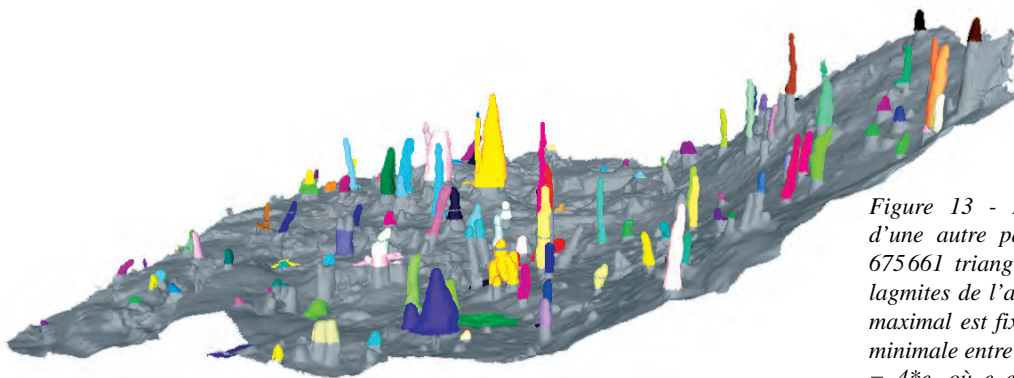


Figure 13 - Résultat d'identification d'une autre partie (341 229 points et 675 661 triangles) de la forêt des stalagmites de l'aven d'Orgnac ; le rayon maximal est fixé à 0,25 m. La distance minimale entre deux stalagmites $d_{min} \geq 4 * e$, où e est la longueur moyenne d'une arête du modèle RTI de résolution 15 mm. Le temps d'exécution est de quelques minutes (entre 5 et 7 min).

Au-delà de cette extraction et du modèle 3D coloré (Figures 12 et 13), la méthode permet d'extraire de manière automatique un certain nombre de paramètres qui seront utiles pour caractériser au mieux l'objet d'étude et permettront ainsi l'exploitation des données. Il s'agit notamment : (i) de la position X, Y, Z des centres de chaque ellipse ; (ii) des longueurs et largeurs de chaque ellipse ; (iii) de l'orientation par rapport au nord du grand axe de chaque ellipse ; (iv) de l'élévation et de la distance projetée (centre de l'ellipse de base au centre de l'ellipse sommitale) ; (v) de la longueur (distance) géodésique (somme des distances séparant deux centres d'ellipses consécutifs) ; (vi) de l'azimut

du déplacement (centre de l'ellipse de base vers le centre de l'ellipse sommitale). Tous ces paramètres permettent de traiter rapidement une information dense et riche sur la totalité de la forêt de stalagmites. De tels traitements ont été réalisés et présentés sous forme spatialisée (Figure 14) (Hajri *et al.*, 2009). Ils ont montré combien il était possible d'extraire et de traiter une grande quantité d'informations à partir de ce travail de segmentation sur modèle 3D. Dans le cas présent, une cartographie de l'orientation des stalagmites a pu être générée et un travail de mesure *in situ* a permis de valider le processus (Photo 2).

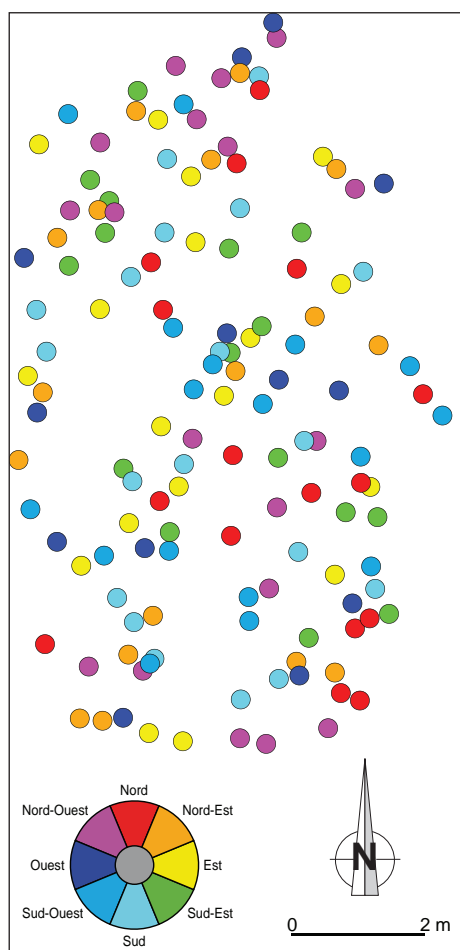


Figure 14 - Présentation cartographique des 134 stalagmites extraites par classe d'orientation. Ces orientations (8 classes) sont calculées ici de la base vers le sommet, entre le centre de l'ellipse de base et le centre de l'ellipse sommitale.



Photo 2 - Mesure sur le terrain des orientations des stalagmites translatées et présentation sur la photographie de quelques stalagmites segmentées.

CONCLUSION

L'objectif du travail présenté ici était triple : il s'agissait de montrer qu'il était possible (i) de travailler sur des formations stalagmitiques sans les perturber, ni même parcourir la zone d'étude, ceci étant motivé ici par des soucis de conservation du site ; (ii) de travailler avec une approche « complète », sur la totalité de l'objet et non de limiter l'étude à un échantillon unique et (iii) d'extraire de manière automatique des informations et des paramètres apportant une réponse précise sur des questions géomorphologiques préalablement établies par le développement de méthodes informatiques adaptées. Ce fut par exemple le cas de la recherche des stalagmites translitées, ayant subi un déplacement de leur axe de croissance, associé à la dynamique des soutirages endokarstiques. Sur ces trois points, il a été possible de montrer l'intérêt de la méthode.

Pour cela, deux méthodes d'extraction ont été développées. La première basée sur le principe de la LPE permet d'extraire des régions à partir d'un critère dis-

criminant : la courbure. Cette méthode présente l'inconvénient de sur-segmenter le modèle, inconvénient qui peut être contourné par des marqueurs placés par l'opérateur. Le caractère fastidieux du travail a été solutionné par le développement d'une seconde méthode : le plan mobile où une succession d'ellipses est ajustée par extraction de points, à partir d'un plan se déplaçant selon sa normale Z.

A l'issue de ces processus de segmentation, les stalagmites extraites constituent une base de données numériques qu'il est possible de traiter statistiquement afin de solutionner différentes questions géomorphologiques. Ce fut par exemple le cas de la question des stalagmites translitées dans l'analyse des soutirages (Hajri *et al.*, 2009). D'autres questions géomorphologiques pourront être éclairées par ce type de développement associant à la fois une analyse complète de l'objet et garantissant les conditions de sa conservation en limitant au maximum le temps de séjour sur le site.

BIBLIOGRAPHIE

- BAKER A., SMITH C., JEX C., FAIRCHILD I.J., GENTY D., FULLER L., 2008. Annually Laminated Speleothems: a review. *International Journal of Speleology*, 37, 3, 221-234.
- BEUCHER S., LANTUÉJOL C., 1979. Use of watersheds in contour detection. Proceeding of the International Workshop on Image Processing Real-Time Edge and Motion Detection/Estimation.
- BEUCHER S., 2004. Unbiased Implementation of the Watershed Transformation based on Hierarchical Queues. CMM Internal note, Paris School of Mines.
- BOEHLER W., HEINZ G., MARBS A., SIEBOLD M., 2002. 3D scanning software: An introduction. In Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, 42-47.
- COUCHOUD I., 2008. Les spéléothèmes, archives des variations paléoenvironnementales. *Quaternaire*, 19, 4, 255-274.
- CURLESS B., 1999. From range scans to 3D models. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 33, 4, 38-41.
- DIGABEL H., LANTUÉJOL C., 1978. Iterative algorithms. Proc. 2nd European Symp. Quantitative Analysis of Microstructures in Material Science, Biology and Medicine, 85-99.
- ESTER M., KREIGEL H.-P., SANDER J., XU X., 1996. A density based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 226-231.
- FITZGIBBON A., PILU M., FISHER R.-B., 1999. Direct least-squares fitting of ellipses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21, 5, 476-480.
- GIROD B., GREINER G., NIEMANN H., 2000. Principles of 3D Image Analysis and Synthesis. Kluwer Academic Publisher, Boston-Dordrecht-London.
- HAJRI S., SADIER B., JAILLET S., PLOYON E., BOCHE E., CHAKROUN A., SAULNIER G.-M., DELANNOY J.-J., 2009. Analyse spatiale et morphologique d'une forêt de stalagmites par modélisation 3D dans le réseau d'Ornac (Ardèche, France). *Karstologia*, 53, 1-14.
- HAJRI S., 2010. Modélisation des surfaces rocheuses naturelles à partir d'une scannerisation laser 3D et extraction automatique de formes caractéristiques : application aux spéléothèmes et surfaces géologiques. Thèse univ. Savoie, 250 p.
- JORDAN C., 1872. Nouvelles observations sur les lignes de faîtes et de thalweg. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 75, 1023-1025.
- MEYER F., 1991. Un algorithme optimal de ligne de partage des eaux. 8^{ème} Congrès AFCET Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle.
- PERRETTE Y., 2000. Etude de la structure interne des stalagmites : contribution à la connaissance géographique des évolutions environnementales du Vercors (France). Développement et application d'une approche multiparamètre des archives stalagmitiques. Thèse Université de Savoie, 324 p.
- VINCENT L., SOILLE P., 1991. Watersheds in digital spaces : An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13, 6, 583-598.

ACQUISITION ET TRAITEMENTS DE NUAGES DE POINTS 3D PAR DES TECHNIQUES LÉGÈRES ET À FAIBLES COÛTS POUR L'ÉLABORATION DE MNT À HAUTE RÉOLUTION

HIGH RESOLUTION DEM CONSTRUCTION

BY LOW-COST, SIMPLE TECHNIQUES AND FREE APPLICATIONS

ESTELLE PLOYON¹, STÉPHANE JAILLET¹, OLIVIER BARGE²

¹ Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

² Archéorient, Université Lumière Lyon 2, Commanderie de Jalès, 07460 Berrias et Casteljau, France.

Contact : Estelle.Ployon@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

Dans le domaine des géosciences, les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sont des données essentielles et souvent de base pour de nombreuses recherches. Or, il s'avère que ces modèles font souvent défaut sur le marché pour travailler à certaines échelles, notamment les plus fines. Des acquisitions spécifiques sont alors nécessaires.

Cette contribution a pour objectif de présenter un retour d'expérience dans l'exploration de méthodes et outils de modélisation 3D à partir de photographies pour réaliser des modèles numériques de terrain à haute résolution, par des techniques légères et à faibles coûts. Elle vise avant tout un public non initié aux techniques pointues de la photogrammétrie et de la corrélation multi-images. Elle présente un protocole allant de l'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant à la restitution de MNT sous SIG en montrant les différentes étapes de traitements et d'analyses ainsi que les outils utilisés. Une attention particulière est donnée à l'évaluation des erreurs dans la chaîne de traitement pour valider la restitution finale.

MOTS-CLÉS : MNT HAUTE RÉOLUTION, MULTI-CORRÉLATION D'IMAGE, NUAGE DE POINTS 3D, LOGICIEL LIBRE, LOGICIEL GRATUIT.

ABSTRACT

In geosciences, Digital Elevation Models (DEM) are very common and are used as base data in many studies. But DEM are not always available on market. This paper explores the use of new technologies based on 3D reconstruction model for acquiring high-resolution DEMs. These technologies use automatic matching of image features to reconstruct information in 3D and use uncalibrated images. This paper presents a protocol to evaluate these cost-effective new tools. It explains the way aerial photographs are taken by kite (KAP) and how images can be treated by automatic 3D reconstruction tools to be used in GIS. It analyses also each step of the proposed protocol in order to evaluate the accuracy of the final DEM.

KEYWORDS: HIGH RESOLUTION DEM, 3D IMAGE RECONSTRUCTION, 3D POINT CLOUD, OPEN SOURCE APPLICATION, FREE SOFTWARE.

INTRODUCTION

L'imagerie et la topométrie sont des modes d'investigation qui produisent des données extrêmement utiles dans l'étude des milieux naturels et notamment en géomorphologie. En effet, l'imagerie, entendue ici principalement par photographies aériennes permet, par son interprétation, d'identifier des morphologies et d'analyser les caractéristiques géométriques des terrains investis. La richesse de la photo-interprétation est très largement liée à la résolution spatiale des images mais aussi à la vision stéréoscopique permettant d'appréhender ces images en relief. Cette vision en 3D des images est rendue possible par un protocole de prises de vue aériennes très calibré dont les caractéristiques permettent une restitution photogramétrique. De celle-ci sont tirées de nombreuses données constituant des bases de données géographiques particulièrement riches et notamment des données topographiques telles que les modèles numériques de terrain. En ce point, l'imagerie (méthode passive) se rapproche de la topométrie qui s'attache à mesurer précisément les formes du relief et à les représenter avec des méthodes plus actives (théodolites, GPS, scanner laser terrestre ou aérien). Elle permet également la production de modèles numériques de terrain à plusieurs échelles selon les techniques utilisées. Bien que l'utilisation de ces modèles soit extrêmement courante dans les disciplines telles que la géologie, la géographie et notamment la géomorphologie, à certaines échelles il n'existe pas toujours de données topographiques sur le marché répondant aux besoins et aux questionnements scientifiques. De fait, dès lors que l'on s'intéresse à des micro-formes, il est courant qu'il faille produire spécifiquement ces MNT, dits à haute résolution. Les coûts de telles acquisitions peuvent très vite être importants selon les méthodes employées, les résolutions et précisions voulues.

Bien que les avancées technologiques récentes et le développement des levés par balayage laser notamment (Grussenmeyer et Landes, 2011) rendent l'acquisition de MNT à haute résolution de plus en plus systématique, il n'en demeure pas moins que ces

données restent onéreuses et pas toujours accessibles et facilement utilisables. Quant à la photogrammétrie « classique » plusieurs points la rendent difficilement envisageable pour une production de MNT de sites d'étude d'emprise spatiale restreinte. En effet, elle nécessite un protocole d'acquisition de photographies très rigide et est donc réservé à des structures maîtrisant ces techniques (cabinets de photogrammétrie, IGN). Mais comme cela a déjà été souligné, la résolution spatiale des images est un critère encore plus contraignant puisque les formes à interpréter doivent être facilement identifiables. Le rapport d'échelle entre clichés aériens et formes à photo-interpréter est très discriminant. Dès lors, quelle alternative reste-t-il pour acquérir des Modèles Numériques de Terrain à des échelles correspondant aux questionnements scientifiques mais restant néanmoins abordables ?

La révolution à laquelle on assiste ces dernières années dans le domaine de la modélisation 3D et plus particulièrement la reconstitution 3D d'objets à partir de photographies semble une solution envisageable, sous certaines conditions (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). Cette contribution a pour objectif de présenter un retour d'expérience dans l'exploration de cette voie pour la production de MNT à haute résolution, par des techniques légères et à faibles coûts, pour une utilisation finale dans les outils classiques de la géographie que sont les SIG et autres applications cartographiques. Il s'agira plus exactement de présenter un protocole allant de l'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant à la restitution de MNT sous SIG en montrant les étapes de traitements et d'analyses en utilisant des applications libres ou gratuites de préférence. Une attention particulière sera portée aux difficultés rencontrées mais aussi aux processus de validation des résultats obtenus. Les limites et les perspectives qu'offrent une telle approche seront enfin présentées avec les évolutions envisagées et/ou envisageables. Nous nous plaçons volontairement dans la position du thématique-utilisateur pour qui les méthodes très pointues de photogrammétrie ne seront pas abordées.

I - PRODUCTION DE NUAGES DE POINTS 3D À PARTIR DE PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES NON CALIBRÉES

1 - Reconstruction 3D d'objets à partir de photographies : une méthode en plein essor

Depuis quelques années nous assistons à un essor spectaculaire des technologies 3D et la modélisation 3D d'objets est devenue courante dans de nombreux domaines. Dans le champ des géosciences, elle permet notamment la reconstitution d'objets naturels sur lesquels il est ensuite possible de travailler et d'extraire des informations très riches. Cela était difficilement

envisageable il y a encore quelques années. Les modélisations en milieux naturels ont notamment été permises par le développement et la mise sur le marché de scanners laser (lidars aéroportés et scanners laser terrestres) autorisant l'acquisition rapide de données topographiques 3D haute résolution. Ces techniques se diffusent très largement aujourd'hui mais les investissements demeurent lourds et parfois disproportionnés par rapport aux réels besoins. Si les modélisations 3D d'objets naturels sont actuellement intimement liées à

la lasergrammétrie, ayant suivi probablement les évolutions industrielles proposées par la rétro-ingénierie et la mesure de précision, il n'en est pas forcément de même dans d'autres domaines. En effet, des avancées marquantes, probablement initiées par le domaine de la robotique et la vision artificielle permettent la reconstruction 3D d'objet à partir de photographies et que l'on retrouve aussi bien en architecture, dans l'étude des patrimoines culturels que dans le domaine de la réalité virtuelle (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). D'ailleurs, des outils très accessibles permettent à partir de simples photographies prises d'un objet de le reconstituer en 3D. Souvent réalisées sur des objets de petites tailles, très symboliques, ces reconstitutions 3D sont très visuelles et très parlantes mais surtout semblent quasi-automatiques. On assiste ainsi à l'essor d'applications presque « ludiques ». On peut citer comme exemple, parmi bien d'autres sans doute, les outils Photosynth (Microsoft), Photofly (Autodesk), Bundler-PMVS ou encore Arc3D webservice. Plusieurs de ces applications sont basées sur du webservice. Dans ce cas, après envoi des photos sur des serveurs distants, il ne reste plus qu'à récupérer le résultat de la reconstitution 3D sous forme de nuage de points ou de modèles maillés. Bien évidemment derrière ces outils, d'utilisation très simple, des méthodes pointues de corrélation multi-images existent, basées sur des techniques photogrammétriques puissantes (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011), mais pour l'utilisateur tout reste transparent.

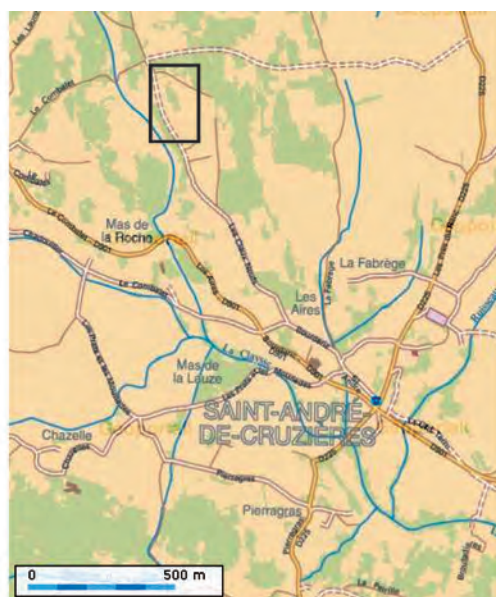
Il semblait donc fécond de tester ces méthodes dans le cadre d'un site test dont l'échelle est adapté à nos problématiques de recherches.

2 - De l'acquisition d'images à la production de nuages de points 3D : protocole méthodologique

Le site d'étude et d'acquisition des photographies aériennes se situe dans le sud Ardèche sur la commune de Saint-André de Cruzières (Figure 1). La campagne s'est déroulée dans le cadre d'une mission de prises de vue aériennes par moyens légers (stage CNRS organisé par Olivier Barge, Archéorient, basé à la commanderie de Jalès, Ardèche). Le site a été choisi pour ses caractéristiques morphologiques. Il est marqué par des micromorphologies très particulières, bien visibles et anthropiques. En effet, cette zone de garrigues fortement rocailleuse (clapas) a fait l'objet de construction de terrasses et pierriers pour une mise en culture ancienne. Le terrain investigué s'étend sur environ 50 m de large et 100 m de long avec des contraintes certaines (arbres, arbustes, herbacées et tas de pierre) dont il faudra tenir compte dans la suite des traitements (Figure 2).

a - Préparation du terrain, cibles au sol et levés GPS

Dans le cadre de ce travail de test, des cibles de couleur (assiettes en plastique d'une vingtaine de centimètres de diamètre) ont été réparties sur l'ensemble du terrain à photographier avec une disposition couvrant les différentes morphologies présentes. Dans les zones relativement plates, les cibles ont été positionnées de manière régulière. Sur certaines zones présentant des



Données : Géoportail, France Raster et Orthophotos



Figure 1 - Localisation du site d'étude.

changements de relief, plusieurs cibles ont été placées de manière à obtenir par la suite des points de contrôle rendant compte au mieux de la morphologie du terrain (Figure 2 et 3). Les cibles ont ensuite été levées au GPS différentiel (Trimble) et post-traitées sur suite logicielle dédiée pour améliorer la précision des mesures.



Pierriers, herbacées, arbustes, arbres et cibles au sol



Disposition des cibles sur un pierrier.
Noter l'importance de la végétation en certains endroits

Figure 2 - Présentation du site - pierriers, herbacées, arbustes, arbres et disposition de cibles.



Figure 3 - Vue générale d'une partie du site marqué par les cibles au sol (ici des assiettes colorées). Photo prise au cerf-volant.

b - Acquisition de photographies aériennes basse altitude et haute résolution : mission par cerf-volant

La mission de photographies aériennes a été réalisée avec un dispositif ultra léger. Il est constitué d'un cerf-volant de type delta et d'un ensemble permettant les prises de vue (Figure 4). La Figure 5 illustre le pro-

cédé utilisé. Un appareil photo Nikon CoolPix P6000 est monté sur une nacelle robotisée et contrôlée par une radio-commande, laquelle permet de manœuvrer l'appareil photo et surtout de déclencher les prises de vue. Ce compact expert à 13,5 millions de pixels effectifs est équipé d'un zoom NIKKOR grand-angle 6-24 mm (28 - 112 mm équiv. en format 24 x 36). Lors de cette mission le zoom a été bloqué sur 6mm (28 mm) pour conserver une focale fixe. Le dispositif de prise de vue est accroché non pas au cerf-volant mais au fil, par un système de pendule, lorsque le cerf-volant est stabilisé à environ 50 m du sol (longueur de fil de 50 m, pour éviter les chutes se produisant souvent au décollage). On laisse ensuite monter le cerf-volant, entraînant le dispositif de prise de vue jusqu'à l'altitude souhaitée. De manière à couvrir au maximum la zone investiguée, de nombreux clichés ont été pris à une altitude de 50 m puis à une altitude de 100 m. De ce fait la mission de photographies réalisée possède une échelle moyenne comprise entre 1/1700 et 1/3500 environ.



Figure 4 - Matériel utilisé : en haut, le cerf-volant utilisé, un delta mono-fil, stable pour ce type d'usage et piloté par un opérateur (à droite), équipé d'un baudrier et d'un enrouleur ; en bas, montage du dispositif de prise de vue aérienne, Appareil Nikon CoolPix P6000 installé sur une nacelle simple. Le déclenchement des prises de vues est assuré par une télécommande.

Cette échelle globale et approximative est évaluée selon la formule classique $1/e=f/H$ (Boureau, 2008), avec :

- f = distance focale de l'objectif de l'appareil photo
- H = élévation par rapport au sol (élévation moyenne)
- e = dénominateur de l'échelle

Cette acquisition permet d'obtenir des photographies haute résolution (3168×4224 pixels) et à grande échelle, chaque photo correspondant au sol à un rectangle projeté, donc déformé, allant de $20 \times 26,6$ m à $40 \times 53,2$ m selon l'altitude. Cela correspond à une résolution moyenne proche du pixel par cm. La qualité des clichés est fonction de la plus ou moins grande stabilité du vent qui peut se traduire par des bougés de prise de vue ; une vitesse d'obturation rapide doit être recherchée.

La technique de photographies à partir d'un ballon captif gonflé à l'hélium donne des résultats comparables : il est difficile de dépasser une altitude de prise de vue de plus d'une centaine mètres alors qu'un cerf-volant permet d'atteindre assez facilement 300 m. En revanche, on s'affranchit plus aisément des obstacles (végétation) et le dispositif de prise de vue est plus stable. Cette technique requiert l'absence de vent.

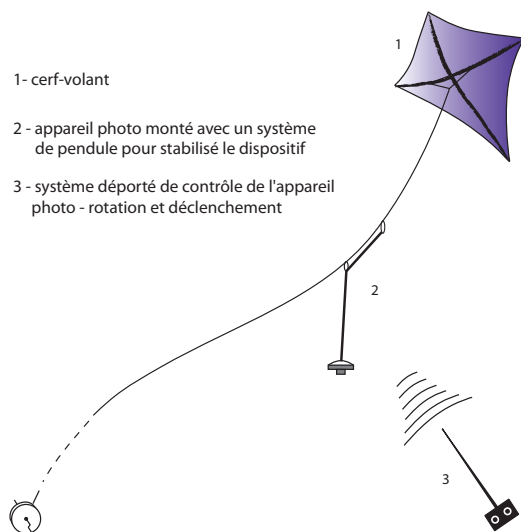


Figure 5 - Dispositif du cerf-volant.

c - Corrélation multi-images : pourquoi le choix d'ARC3D web service ?

De nombreux outils de reconstruction 3D à partir de photographies existent et se développent très rapidement. Pour le moment, la plupart des solutions sont encore gratuites mais il est possible qu'elles deviennent payantes à court ou moyen terme. En effet, certains sont sous licence propriétaire (Microsoft, Autodesk) et d'autres ont fait l'objet de demande de brevet. Par exemple, l'application Photofly (Autodesk) stipule à son ouverture que le produit est gratuit jusqu'en août 2011.

Afin de mieux comprendre ce qui a motivé le choix de l'outil, utilisé ici pour la reconstruction de nuages de points 3D, nous proposons un bref descriptif des principaux logiciels disponibles actuellement. Ce point permettra également d'orienter les utilisateurs potentiels.

- Bundler :

Bundler est sans doute l'application la plus connue et sert d'ailleurs de base à d'autres programmes comme nous le verrons. Bundler (Snavely *et al.*, 2006 ; 2007) a été conçu pour travailler avec des collections d'images non organisées et non calibrées et provenant même d'internet. Il est basé sur des recherches dans le domaine des systèmes automatiques de structure à partir du mouvement (*Structure from Motion*, SfM) et est dérivé de travaux similaires (Lourakis et Argyros, 2004, 2009). Il fonctionne sur le principe de prendre une collection d'images, de chercher des caractéristiques dans les images et de les mettre en correspondance entre elles. Il produit avant tout une reconstruction 3D des positions de prise de vue des images (caméras) et un nuage de point très peu dense et donc très partiel. De fait, Bundler est avant tout un programme de mise en correspondance d'images et non un outil de reconstruction 3D de nuages de points. Par conséquent, il doit être utilisé avec d'autres applications notamment PMVS (Patch-based Multi-view Stereo Software), et maintenant CMVS (Clustering Views for Multi-view Stereo) distribué en GNU General Public Licence et enrichi par une communauté autour de Y. Furukawa et J. Ponce (Furukawa et Ponce, 2009, 2010 ; Furukawa *et al.*, 2010). La distribution de ces applications est proposée en fichiers binaires ou en code source et n'est pas très simple à mettre en œuvre. Il faut ajouter plusieurs librairies et autres utilitaires. Ce choix bien qu'intéressant n'a pas été retenu ici.

- Photosynth :

Photosynth est une application Microsoft dérivée des travaux de recherche émanant de l'Université de Washington et du pôle recherche de Microsoft (Snavely *et al.*, 2006, 2007) lesquels visaient, à partir de photographies de tourisme, à reconstruire des nuages de points 3D et proposer de nouvelles manières de parcourir et visualiser des photos. Photosynth a donc les mêmes origines que Bundler, et est basé sur les mêmes travaux de vision artificielle et de recherche de structure à partir d'images en mouvement (*Structure from Motion*, SfM). Cette application est maintenant un service internet qui permet à tout un chacun de transférer des images vers des applications distantes via une interface simple, et ainsi reconstruire des nuages de point 3D à partir des photographies prises selon différents points de vue. Cette application gratuite est donc avant tout ludique même si quelques travaux de recherche ont utilisé cet outil pour créer des modèles numériques de terrain à visée scientifique pour le suivi d'érosion (Dowling *et al.*, 2009). Le problème principal de cette

application est la récupération des nuages de points produits, pour les traiter et les utiliser ensuite mais surtout la mise sur internet des reconstructions et des images utilisées. Cela pose un problème de droits et de confidentialité des données tant utilisées que produites. Nous n'avons donc pas retenu cette solution de reconstruction 3D à partir de photos.

– Photofly :

Photofly est également un service internet permettant la reconstruction 3D à partir d'images. Cette application propriétaire (Autodesk) fonctionne un peu sur les mêmes principes que Photosynth mais propose en plus des modules d'inspection (mesures, mise à l'échelle, orientation horizontale et verticale des modèles produits). Cet outil est encore gratuit, car en développement, mais probablement voué à être intégré à des solutions logicielles existantes et détenues par Autodesk. En effet, les résultats obtenus sont récupérables mais déjà dans des formats propriétaires, appartenant à l'éditeur.

– Arc3D web service :

Ce dernier est né d'un réseau collaboratif dans le domaine de l'étude, de la protection et de la mise en valeur des patrimoines culturels. Ce réseau européen nommé EPOCH (European Network of Excellence), regroupant de nombreuses institutions, a initié un projet autour de l'acquisition et de la représentation 3D, précises et réalistes, d'objets architecturaux et patrimoniaux. Un des objectifs de recherche envisagés était notamment de concevoir des outils de reconstruction 3D abordables et flexibles (Pollefeys *et al.*, 2001 ; Vergauwen et Gool, 2006 ; Cignoni *et al.*, 2008) à partir d'images. Au delà d'une accessibilité d'ordre financier cela impliquait également une certaine robustesse du système envisagé, permettant une utilisation par une large communauté d'utilisateurs et des protocoles simples et notamment pour l'acquisition de prises de vue photographiques (Pollefeys *et al.*, 2001). Ce projet est clairement orienté vers la qualité de la représentation des reconstructions 3D et donc la réalité virtuelle et la communication (Vergauwen et Gool, 2006). Arc3D est un web service gratuit intégrant toute la chaîne de traitement. Il suffit de télécharger une petite application qui permet d'envoyer les images à traiter vers un serveur distant. Un enregistrement comme utilisateur du service est nécessaire mais contrairement à Photosynth, les données envoyées ne sont pas accessibles à d'autres utilisateurs. Comme les outils précédemment présentés, Arc3D est basé sur des principes de vision artificielle, d'automatisme (Structure from Motion) et de photogrammétrie. Cet outil de reconstruction 3D à partir d'images est utilisable avec MeshLab, logiciel de modélisation 3D libre, pour ce qui concerne l'exploitation des données (Cignoni *et al.*, 2008). La reconstruction 3D est transparente pour l'utilisateur, prévenu par mail de l'achèvement du processus et du téléchargement des résultats à effectuer.

Les différentes caractéristiques d'Arc3D ont été essentielles dans notre choix de solution de reconstruction de nuages de points 3D à partir de photographies non-calibrées. En effet, non seulement cette application semblait simple d'utilisation mais se voulait également robuste et souple en fonction des applications envisagées ce qui correspondait parfaitement à nos besoins. Mais ce qui a vraiment déterminé ce choix, c'est que l'utilisateur puisse avoir la main sur certains points du traitement. Les fonctionnalités de cet outil seront détaillées dans la partie suivante.

D'autres applications existent et/ou sont en cours de développement (Suite logicielle libre de l'IGN notamment) mais ces solutions sont plus destinées pour le moment à des utilisateurs avancés car elle demandent des pré-requis informatiques et théoriques importants (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011).

d - Protocole acquisition-traitement-évaluation : synthèse

Après avoir présenté les principales étapes d'acquisition d'images (préparation terrain, prises de vue par cerf-volant) et le choix réalisé (outil de reconstruction 3D) menant à la production de nuages de points 3D, il semble opportun de replacer ces étapes dans une démarche plus globale d'acquisition-traitement-évaluation permettant d'envisager la constitution d'un modèle numérique de terrain à haute résolution.

La Figure 6 présente les éléments essentiels du protocole envisagé ainsi que les outils utilisés. Dans un

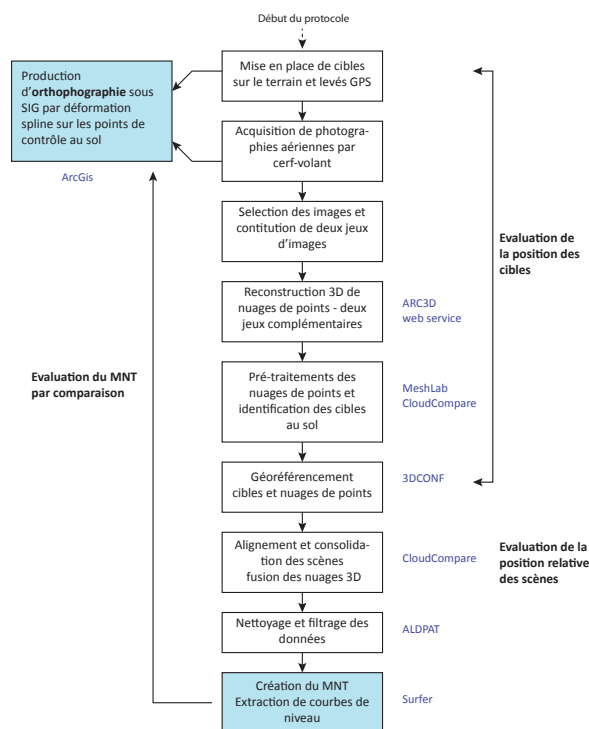


Figure 6 - Protocole.

premier temps, les photographies aériennes acquises permettent de réaliser des orthophotographies simples grâce aux levés GPS des cibles au sol et identifiables sur les photos. Ces orthophotographies sont réalisées sous logiciel SIG par déformations « *spline* » des images, déformations rendues possibles par le nombre important de point de contrôle au sol (74 points). Cette première étape du travail vise à avoir une bonne représentation du site et servira ultérieurement dans le rétro-contrôle final.

Deux jeux de photographies ont ensuite été réalisés à partir des différentes images acquises par cerf-volant. L'objectif est ici d'analyser la robustesse et la justesse de l'outil de reconstitution 3D, Arc3D. En effet, les deux jeux de photographies produiront deux reconstitutions différentes qui seront évaluées lors de leur assemblage et après géoréférencement, lequel sera également évalué par comparaison avec les points de contrôle au sol levés par GPS. La procédure proposée s'attache à contrôler les différentes étapes et les différents outils utilisés pour la production de MNT haute résolution.

II - TRAITEMENTS DES NUAGES DE POINTS 3D

1 - Arc3D web service : envoi des données

L'envoi des données vers Arc3D web service est extrêmement simple, il suffit via une interface de charger toutes les images devant servir à la reconstitution de la scène, de faire analyser la validité des données (contrôle de flou notamment) et ensuite envoyer les images sur le server d'Epoch (<http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3D/webservice/v2/>) (Figure 7). Il a été procédé à deux envois de séries d'images non identiques mais complémentaires en termes d'emprise spatiale et d'orientation des images. La première composition d'images (scène) comporte 60 images et la seconde 32 images. Le système va recalculer automatiquement les paramètres de calibration internes des images, retrouver les positions relatives des caméras et calculer des mises en correspondance denses.

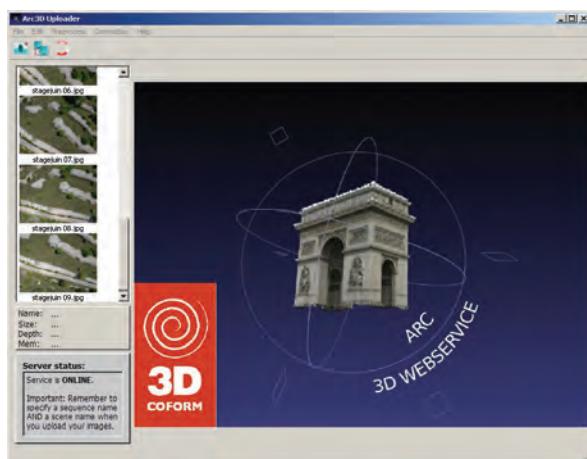


Figure 7 - Interface de chargement des images sur Arc3D.

2 - Paramètres de reconstruction et traitements

Une fois la reconstitution réalisée, un message électronique invite à télécharger les résultats des reconstructions 3D établies à partir des images envoyées. Les dernières modifications apportées au service permettent de récupérer deux types d'information, un répertoire

zippé contenant un modèle maillé et texturé (voir exemple sur planche hors-texte) et un second répertoire zippé contenant les résultats de la reconstruction 3D avec toute une série d'informations relatives aux calculs effectués sur les données de départ. Ces dernières données sont exploitables sous forme de projet avec une application proposée par Arc3D web service ou avec MeshLab (<http://meshlab.sourceforge.net/>) au format v3d. Dans le cas présent, MeshLab a été préféré car il permet de nombreux traitements sur les modèles. A ce stade il s'agit d'une pseudo-reconstitution car il n'est pas encore question de nuage de points 3D mais de cartes de profondeur issues des multi-corrélations d'images qui seront transcrites en mesure 3D à l'étape suivante dans Meshlab.

La Figure 8 montre l'interface d'ouverture du projet de reconstitution 3D dans MeshLab. C'est à ce niveau que l'utilisateur peut faire des choix et orienter la reconstruction en fonction des objectifs et des données de départ. Cette étape est très importante car les réglages effectués ici induiront des reconstitutions 3D plus ou moins denses et précises. Il est donc conseillé de faire plusieurs tentatives et essais. C'est une inspection des résultats de reconstitution qui est finalement proposé. Il convient tout d'abord d'observer les cartes de profondeur dans la partie droite de l'interface. Pour chaque image traitée, il est présenté une composition colorée permettant d'évaluer la qualité des cartes de profondeurs estimées. Plus les couleurs vont vers le vert-bleu meilleure sera la précision de reconstitution des points 3D. Il est donc important de choisir les meilleures images pour la suite et de définir un seuil minimum en-dessous duquel les données ne seront pas considérées. Dans le cas présent, pour les deux scènes traitées, le seuil de qualité a été fixé à 4 (l'estimation de la projection 3D se fait sur 4 images minimum) comme valeur minimale de précision et seulement 4 images ont été choisies, celles couvrant au mieux la surface terrain. Prendre toutes les images du projet (respectivement 60 et 32) est totalement inutile car ne fait qu'ajouter de la redondance voire du bruit dans le modèle final. Il faut également procéder à un échantillonnage des photos car leur résolution importante de départ, utilisée et

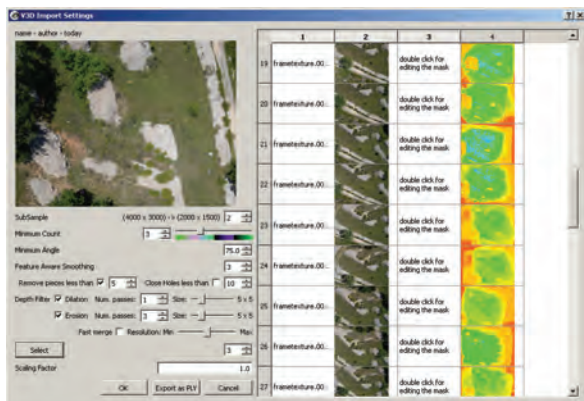


Figure 8 - Import des résultats de la reconstitution avec Arc3D web service.

nécessaire dans les calculs de multi-corrélation, n'est plus indispensable pour la suite de ce test. La lourdeur des fichiers devient trop importante et les données bien trop résolues pour l'application finale envisagée. Le choix d'un seuil d'échantillonnage de 10 s'est même imposé pour obtenir des fichiers ne comportant pas trop de points et pouvant être raisonnablement utilisés ensuite et surtout présentant une précision équivalente dans les dimensions X, Y et Z (Cignoni *et al.*, 2008). Il convient également de traiter dès à présent un minimum le bruit des nuages de points, souvent présent dans ce type de reconstitution automatique, avec les filtres de dilatation et d'érosion proposés. Cette approche combinée érosion-dilatation nettoie les erreurs pouvant se produire aux limites de chaque zone présentant des variations importantes de profondeurs par élimination de bandes de pixels et donc de points. De plus, dans les zones extrêmement plates où il n'existe pas de caractéristiques morphologiques marquées, permettant une très bonne mise en correspondance, la reconstruction est toujours un peu « bruitée », ces filtres permettent d'atténuer ces phénomènes un peu à la manière d'un lissage.

Une fois ces choix d'images et de paramètres effectués, la reconstitution 3D peut-être faite et enregistrée en fichier « PLY » (Stanford Triangle Format, format très utilisé dans le domaine du 3D en version binaire ou ascii et donc lisible par beaucoup d'applications).

Le résultat est consultable notamment dans MeshLab pour analyse et nettoyage. Les deux reconstitutions 3D réalisées dans le cadre de ce test sont des modèles maillés comportant respectivement 271 784 et 208 665 sommets (pour des scènes représentant au sol 2 060 m² et 1 625 m², soit environ 130 pts/m², valeurs déterminées après géoréférencement) (Figure 9)

A ce stade les résultats sont des modèles 3D mais en coordonnées purement relatives au processus de reconstitution. La métrique est juste, à un facteur d'échelle, de rotation et de translation près. Il s'agit dès lors de retrouver ces différents paramètres de transformation permettant le géoréférencement et c'est probablement l'étape la plus difficile du processus de restitution de MNT par ces méthodes automatiques à partir d'images.

3 - Consolidation des nuages de points et géoréférencement

Dans le cas présenté ici, les cibles posées au sol et bien visibles dans les nuages de points colorés et également levées au GPS vont permettre cette détermination des paramètres de référencement. La technique la plus simple pour réaliser cela est d'identifier les coordonnées des cibles dans les nuages de points 3D et de procéder à une transformation de ces points sur la base des coordonnées terrain par une transformation conforme des points 3D, basée sur les moindres carrés.

Plusieurs outils permettent de faire cette transformation. Il a été choisi d'utiliser l'application Open Source 3DCONF (Dewitt, 1998) pour sa robustesse et sa facilité d'utilisation. Il a néanmoins été nécessaire de modifier légèrement le code source et de recompiler l'application de manière à augmenter le nombre de points pouvant être traités. Pour les deux scènes réalisées, les coordonnées des cibles ont été recherchées et enregistrées avec l'outil « Pick Point » dans MeshLab (Figure 10 a). Pour chaque scène, sept points cibles ont été utilisés pour le calcul des paramètres de transformation et les autres points cibles comme points inconnus à traiter. Cela a permis une évaluation des coordonnées calculées des cibles par comparaison avec les points GPS (Figure 10 b), avant de traiter l'ensemble

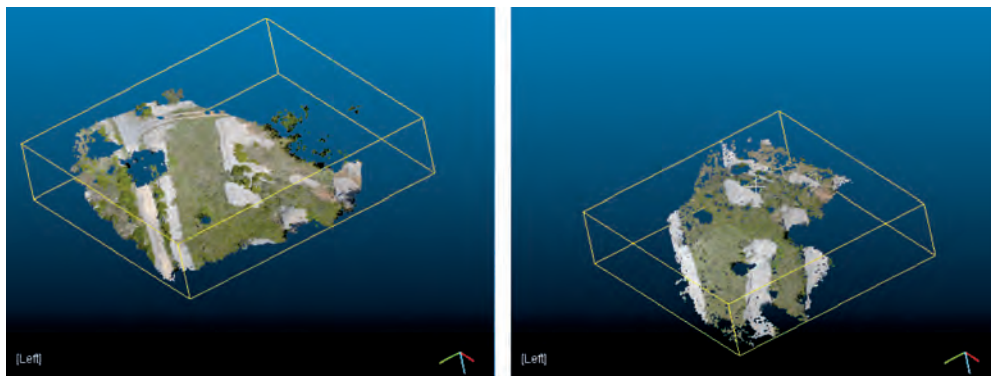
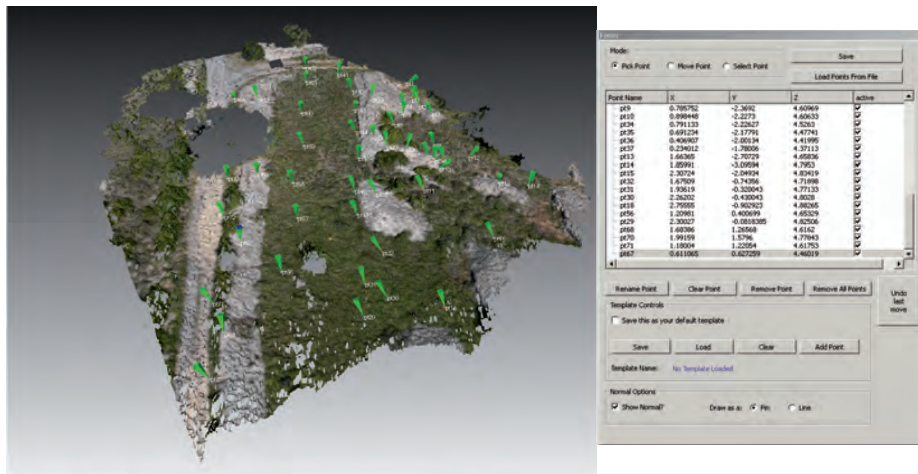


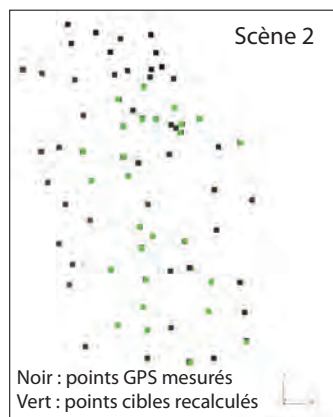
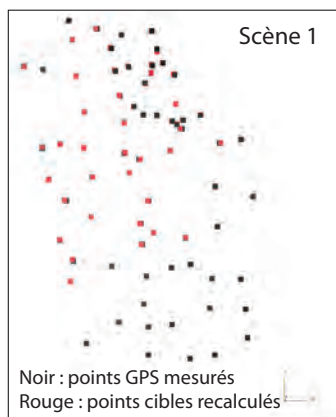
Figure 9 - Deux vues cavalières de restitution des modèles 3D à l'issue des traitements. Noter les nuages de points colorés et continus. Les trous visibles dans les nuages de points sont liés aux arbres bien visibles et masqués dès la reconstitution.

a - Extraction des coordonnées des cibles



Identification des cibles dans les nuages de points et extraction des coordonnées associées dans le référentiel relatif à la reconstruction 3D (MeshLab)

b - Géoréférencement et évaluation des transformations



Transformations conformes 3D sur les points cibles (3DCONF)

Comparaison avec les points GPS initiaux

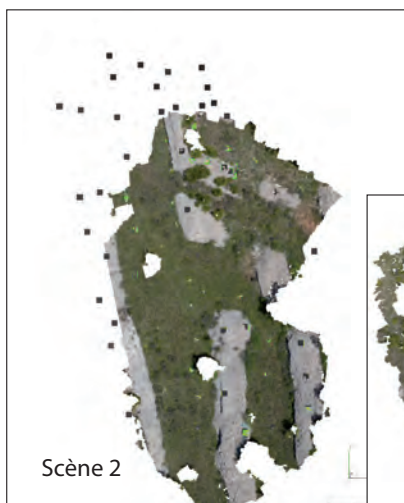
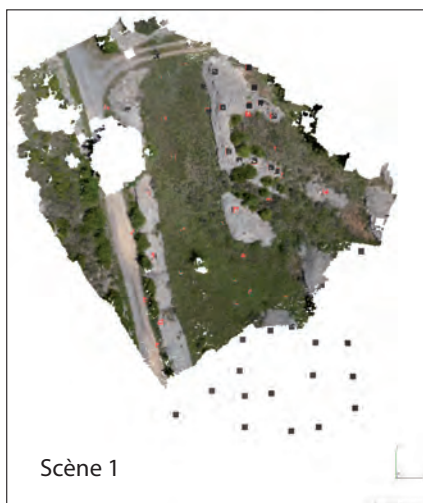
Scène 1 - 50 points de contrôle

	ΔX	ΔY	ΔZ
médiane	0.03	-0.04	-0.03
moyenne	0.05	-0.03	-0.03
écart-type	0.11	0.11	0.11
erreur min	0.00	0.00	0.00
erreur max	0.34	0.46	0.28

Scène 2 - 42 points de contrôle

	ΔX	ΔY	ΔZ
médiane	-0.03	0.01	-0.02
moyenne	-0.02	0.02	-0.02
écart-type	0.10	0.09	0.06
erreur min	0	0	0
erreur max	0.25	0.228	0.157

c - Géoréférencement et consolidation des nuages de points



Transformations conformes 3D des deux nuages de points (3DCONF)

Fusion des deux nuages de points après évaluation des alignements (CloudCompare)



Paramètres de transformation appliqués sur les nuages de points 3D

Param	Value	Stan.Dev.
scale	8.26839	0.01047
omega	169.7473d	0.0808d
phi	6.9378d	0.1912d
kappa	52.6747d	0.0795d
Tx	796141.08	0.13
Ty	635898.49	0.06
Tz	214.08	0.08

Scène 1

Param	Value	Stan.Dev.
scale	8.293	0.012
omega	171.7166d	0.2041d
phi	4.7408d	0.1309d
kappa	52.2044d	0.0859d
Tx	796141.31	0.09
Ty	635897.93	0.13
Tz	215.17	0.07

Scène 2

Figure 10 - Procédure de consolidation et géoréférencement des nuages de points 3D.

des nuages de points (Figure 10c). La Figure 10 synthétise l'ensemble de la procédure de transformation et de géoréférencement associés. Les erreurs apparaissant dans les transformations sur les points de contrôle sont relativement faibles, de l'ordre de quelques centimètres (du même ordre de grandeur que les mesures GPS elles-mêmes). Il existe certes quelques points avec des erreurs plus importantes lesquelles sont très probablement induites par une erreur de mesure terrain des cibles car pour les deux scènes, ce sont les mêmes cibles qui possèdent les plus grandes erreurs.

L'outil de transformation 3D des coordonnées utilisé ici permet de rassembler deux étapes importantes, celle du géoréférencement des nuages de points en coordonnées Lambert 93 et du même coup la consolidation efficace des deux nuages (alignement). Les paramètres appliqués aux deux nuages sont quelque peu différents. En effet, chaque nuage possède son propre référentiel, lié au processus de reconstruction. Les deux nuages de points produits à partir des deux reconstitutions différentes peuvent être fusionnés à l'issue de cette transformation de coordonnées. Cela

montre également que la reconstitution 3D à partir de l'outil Arc3D web service est robuste et fiable puisque des nuages issus de reconstructions différentes peuvent parfaitement être assemblés après correction des paramètres de transformation (échelle, rotation, translation). Cette étape a également été validée en utilisant CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2007), application spécifiquement conçue pour comparer des nuages de points (développés à EDF R&D et Telecom ParisTech et maintenue depuis). Il a notamment été possible de calculer les distances locales entre les deux nuages denses et de valider ainsi la consolidation. Notons également que CloudCompare est très complémentaire de MeshLab, notamment pour la conversion de format de maillage en nuage de points. En effet, les formats de maillage 3D ne sont pas utilisables dans les applications SIG classiques ni dans 3DCONF qui travaillent avec des nuages de points uniquement.

À l'issue de ces différentes étapes, la restitution d'un modèle numérique de terrain haute résolution peut maintenant être envisagée à partir du nuage de points 3D géoréférencé.

III - ELABORATION DU MNT

1 - Filtrage des données : MNE vers MNT

Le géoréférencement réalisé a induit une grande transformation des coordonnées. Or de nombreux logiciels orientés 3D gèrent très mal les coordonnées avec de grands chiffres, ce qui est le cas par exemple des coordonnées Lambert en mètre. Il convient donc de revenir vers des applications plus adaptées, à savoir les SIG et autres applications utilisant des données en coordonnées terrestres. Une dernière étape est encore nécessaire avant la production et le traitement de MNT. Il s'agit de nettoyer le nuage de points qui comporte du bruit, des artefacts ou des données inutiles. En effet, le terrain étudié et photographié comporte de la végétation herbacée, des arbustes et des arbres (Figures 2 et 3). Le nuage de points comporte donc de nombreux points du « sur-sol » qu'il convient d'éliminer pour bien restituer un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et non un MNE (Modèle Numérique d'Elevation).

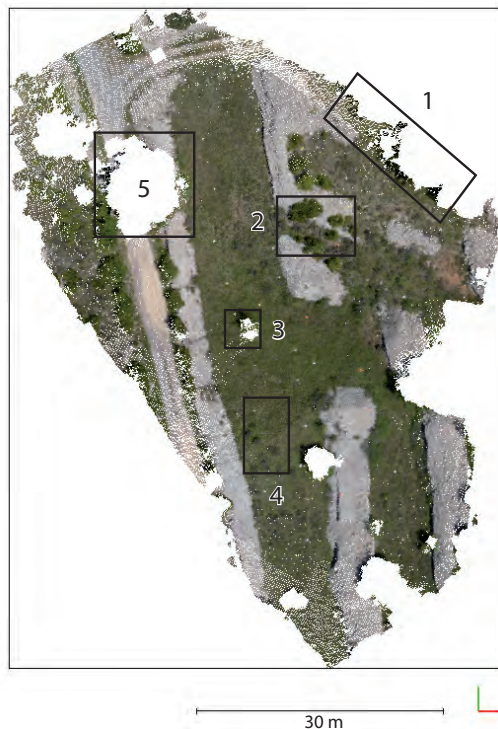
Pour se faire, et toujours en gardant à l'esprit la logique initiale d'utilisation d'outils libres ou gratuits, il a été choisi de filtrer les données avec l'application ALDPAT (Zhang et Cui, 2007) développée et utilisée en lasergrammétrie aérienne pour filtrer les acquisitions à retours d'ondes complètes (ROC). Après un nettoyage manuel des arbres les plus visibles, plusieurs filtres spécifiques automatiques ont été utilisés, notamment ceux basés sur des seuils d'élévation par rapport à des minimums locaux avec une fenêtre variable et ceux basés sur des composantes morphologiques du terrain.

Les étapes ne sont pas ici très détaillées car dépendent beaucoup des données et du type de terrain investis. La Figure 11 illustre néanmoins cette procédure de filtrage. Au départ le nuage de points comporte 480 500 points pour une surface de 2800 m² (170 pts/m²) avec une redondance sur les zones de recouvrement des deux scènes. À la fin du processus, le nuage compte 99 400 points pour 2800 m², soit une moyenne de 35 pts/m². On constate que la végétation reste difficile à éliminer complètement et nécessitera encore un nettoyage manuel.

2 - Maillage et visualisation dans les outils classiques de cartographie

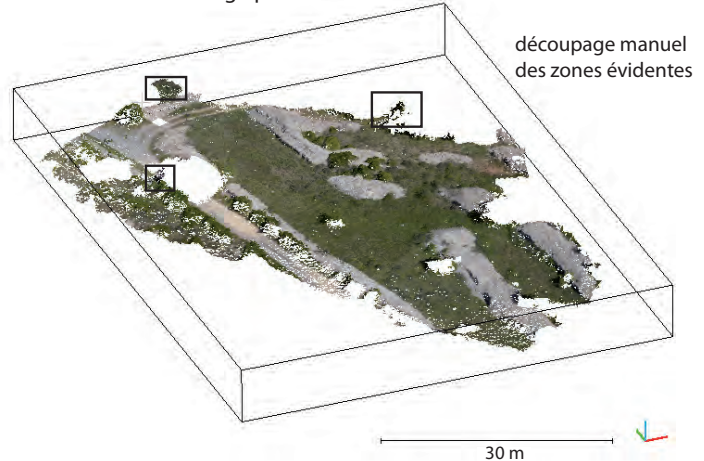
Le nuage de points 3D issu de la reconstruction automatique à partir d'images non calibrées est maintenant à même d'être utilisé. Il a été procédé au maillage des données en utilisant une triangulation Delaunay 2.5D au pas de 10 cm. Les données sont ensuite traitées classiquement et peuvent servir de base pour des recherches particulières à des échelles très fines. La Figure 12 propose un aperçu du résultat de ce protocole de restitution de MNT haute résolution par relief ombré et courbes de niveaux tous les 10 cm. Elle permet aussi de replacer les résultats obtenus sur une orthophotographie produite indépendamment et selon une autre méthode (cf protocole Figure 6). Ce dernier point permet *in fine* de valider l'ensemble de la procédure même si ce n'est que par comparaison visuelle, donc naturaliste.

Nuage de points 3D colorisé et géoréférencé



- 1 - Zones de marge. Artefacts liés aux arbres et manques de données
- 2 - Arbustes et petits arbres à filtrer
- 3 - Artefacts de reconstruction d'arbres à filtrer
- 4 - Herbacées et petits arbustes
- 5 - Les trous sont de grands arbres éliminés pendant la reconstruction

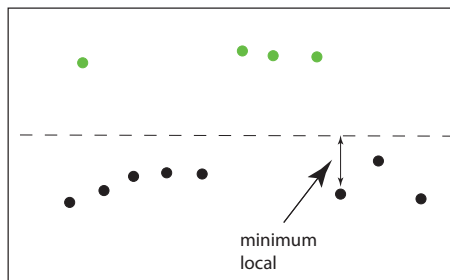
Vue 3D du nuage pour visualiser les zones à filtrer



découpage manuel
des zones évidentes

Filtrage du nuage de points 3D - séparation des points du sol et du sur-sol par filtres automatiques

Filtre : Elevation Threshold with Expend Window (ETEW)

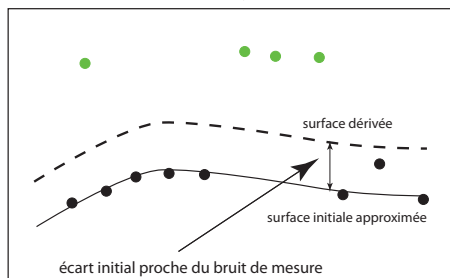


(d'après ZHANG et CUI, 2007)

Principes :

Dans une zone donnée, les variations d'élévation peuvent permettre de séparer les données du sol et du sur-sol. La zone est subdivisée en une grille régulière à cellule carrée et tous les points autres que les minimums sont supprimés. La taille des cellules est augmentée à l'itération suivante et les points ayant une élévation supérieure à un seuil donné sont supprimés.

Filtre : Progressive Morphology (PM)

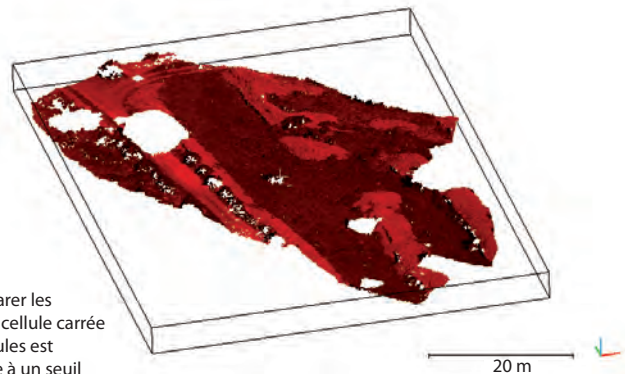


(d'après ZHANG et CUI, 2007)

Principes :

Une grille avec une maille suffisamment fine pour qu'il y ait plusieurs points par cellule est superposée au nuage de points. Une première surface d'ajustement est créée à partir des minimums de chaque cellule. Selon le principe d'érosion-dilatation une seconde surface est dérivée et les écarts entre les deux surfaces comparés à un seuil prédéfini. Cela permet de déterminer si le point est un point au sol ou non. Etapes reconduites en augmentant la fenêtre du filtre progressivement.

Filtrage par recherche des minimums locaux pour le bruit de mesure



Filtrage par morphologie progressive pour la végétation

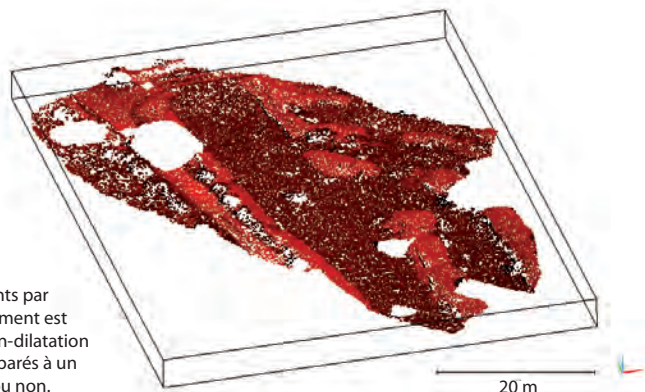


Figure 11 - Filtrage du nuage de points 3D.

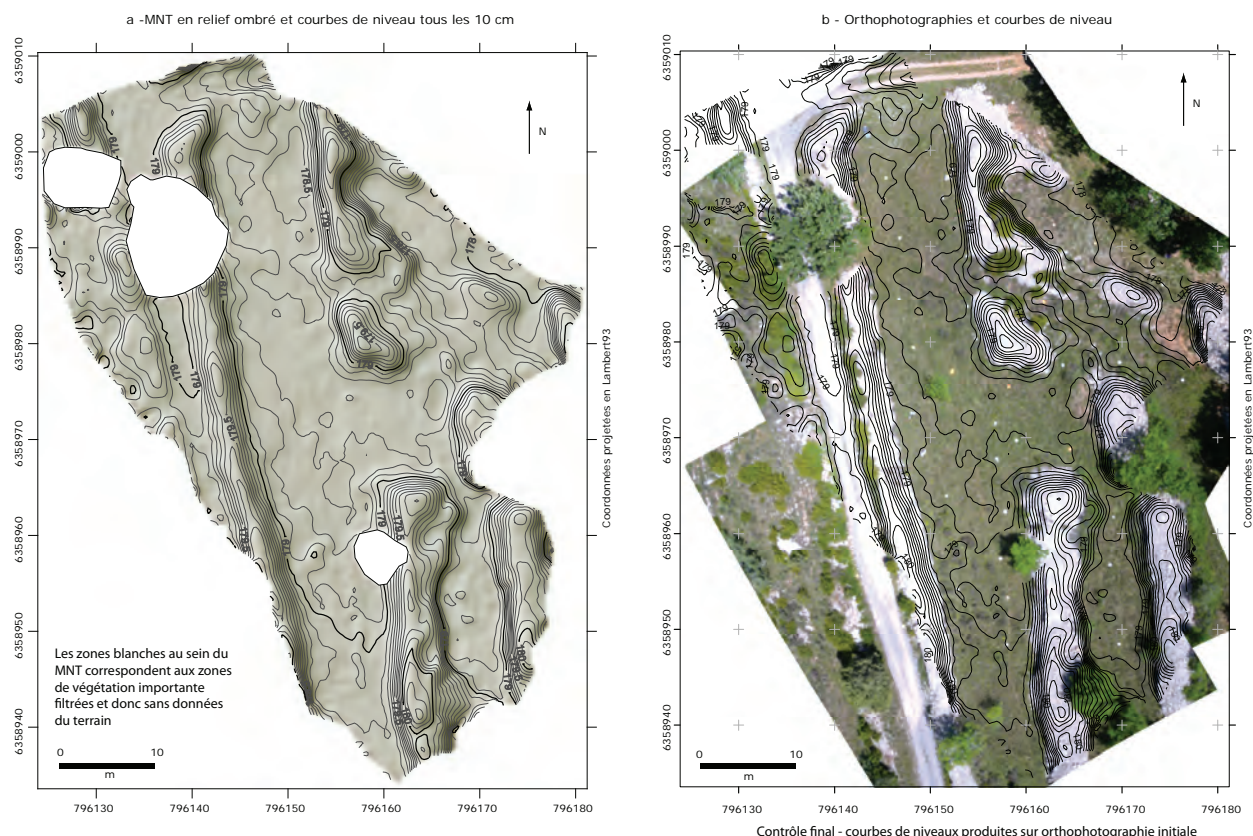


Figure 12 - MNT haute résolution en relief ombré et courbes de niveaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce protocole de production de MNT haute-définition par reconstruction 3D à partir de photographies, par des techniques légères et à faibles coûts (tant dans l'acquisition que dans le traitement), est très encourageant. Il montre non seulement les potentialités effectives de ces méthodes qui pourraient être très complémentaires des acquisitions par lidar mais aussi leur accessibilité à des non spécialistes.

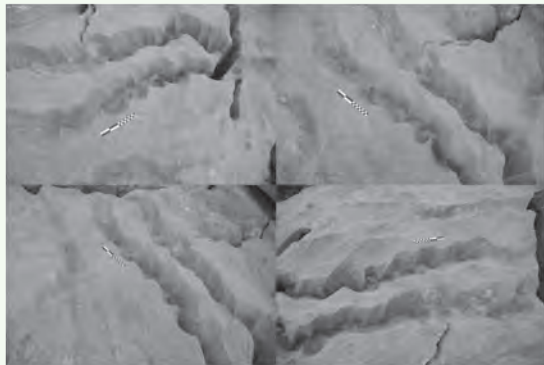
Cette contribution avant tout technique et méthodologique permet aussi d'envisager de nouvelles voies d'acquisition de données en milieux difficiles et parfois inaccessibles. Ces méthodes pourraient notamment être adaptées à des terrains où les levés au lidar sont très rasants et induisent des problèmes d'acquisition (Astrade *et al.*, 2011). De manière à obtenir des restitutions de meilleure qualité encore, il faudrait probablement s'orienter vers des outils de reconstruction permettant de travailler avec des images un minimum calibrées (Suite logiciel IGN orientée métrologie par exemple) et surtout plus homogènes. A ce titre, les évolutions techniques récentes en termes de modélisme et d'hélicoptères radiocommandés à 6-8 hélices, puissants et aussi très stables, pourraient permettre d'acquérir des photographies aériennes

basses altitudes selon un protocole mieux maîtrisé. Des essais sont d'ores et déjà prévus avec un hélicoptère équipé d'un GPS et d'un appareil reflex. Des solutions de préparation de mission aérienne, via des logiciels SIG et ensuite transmises au modèle réduit avant le vol, existent déjà. Elles permettent d'envisager des prises de vue optimales et surtout que l'on pourrait reconduire régulièrement dans le temps pour le suivi diachronique d'objets de recherche en géosciences (torrent, glissement de terrain, glaciers...). Ces méthodes d'acquisition sont elles aussi en pleine évolution et devraient connaître un essor certain tant les coûts deviennent abordables (1-2 K€). Il n'en demeure pas moins que ces méthodes ne sont pas utilisables dans certains contextes comme les terrains fortement végétalisés. La présente étude montre d'ailleurs que la végétation est un réel problème dont on ne peut pas toujours s'affranchir avec facilité.

Bien que la prise en main et l'utilisation de ces techniques requièrent un certain temps, nul doute que leur démocratisation est en marche. Gageons que ces développements, toujours plus rapides, trouveront applications et serviront au mieux les disciplines scientifiques qui sauront les utiliser, des géosciences à l'archéologie.

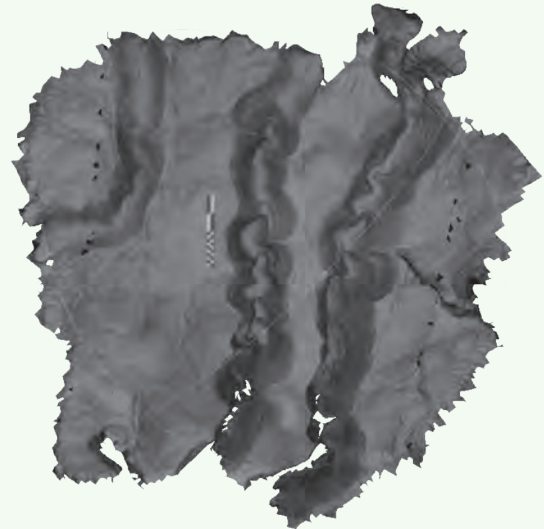
Exemple de reconstruction automatique sous Arc3D web service de micro morphologies karstiques

Echantillon de photographies prises à la main en tournant autour de l'objet.

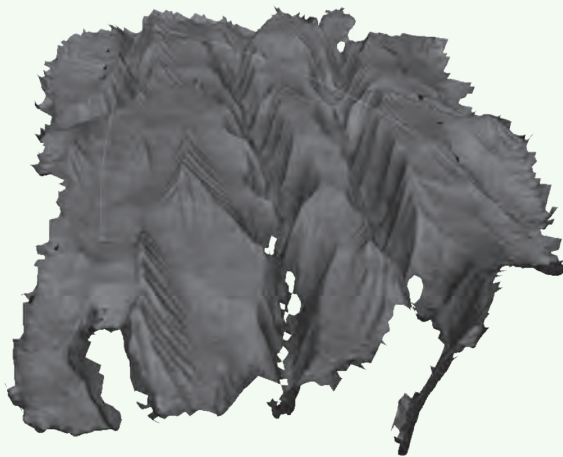


noter la taille de l'objet : échelle dans la scène = 20 cm

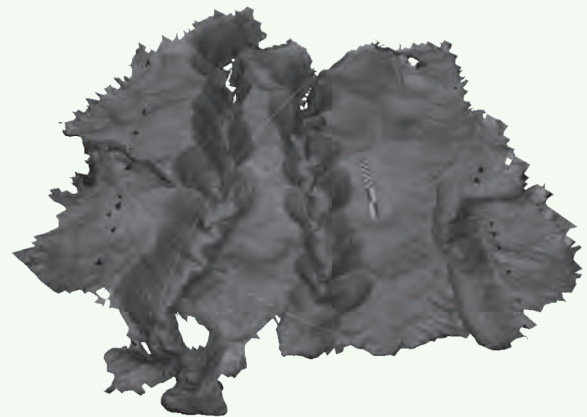
Reconstitution 3D et modèle maillé texturé



vue de dessus



vue 3D



autre vue 3d

Les images présentées ici sont directement des modèles 3D, maillés (.obj) et texturés (textures multi-images). L'utilisateur récupère dans ce cas un modèle sur lequel il n'intervient pas lors de l'étape de reconstruction. Tout est géré par la chaîne de traitement - sélection des images, nettoyage du bruit, carte de profondeurs, maillage du modèle. Dans ce cas le modèle peut servir à des travaux d'inspection intéressants après une mise à l'échelle et un référencement local ou global si nécessaire.

Remerciements

Nous souhaitons remercier tous les membres du stage « techniques d'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant » (stage « CNRS – Entreprises », organisé par O. Barge, Archéorient) qui ont contribué à l'acquisition des données terrain. Elisa Boche, Richard Kotarba, Emmanuelle Régagnon. Les auteurs ont trouvé un aide précieuse en William Castaings, lequel nous a grandement aidés dans la modification du code de 3DCONF.

BIBLIOGRAPHIE

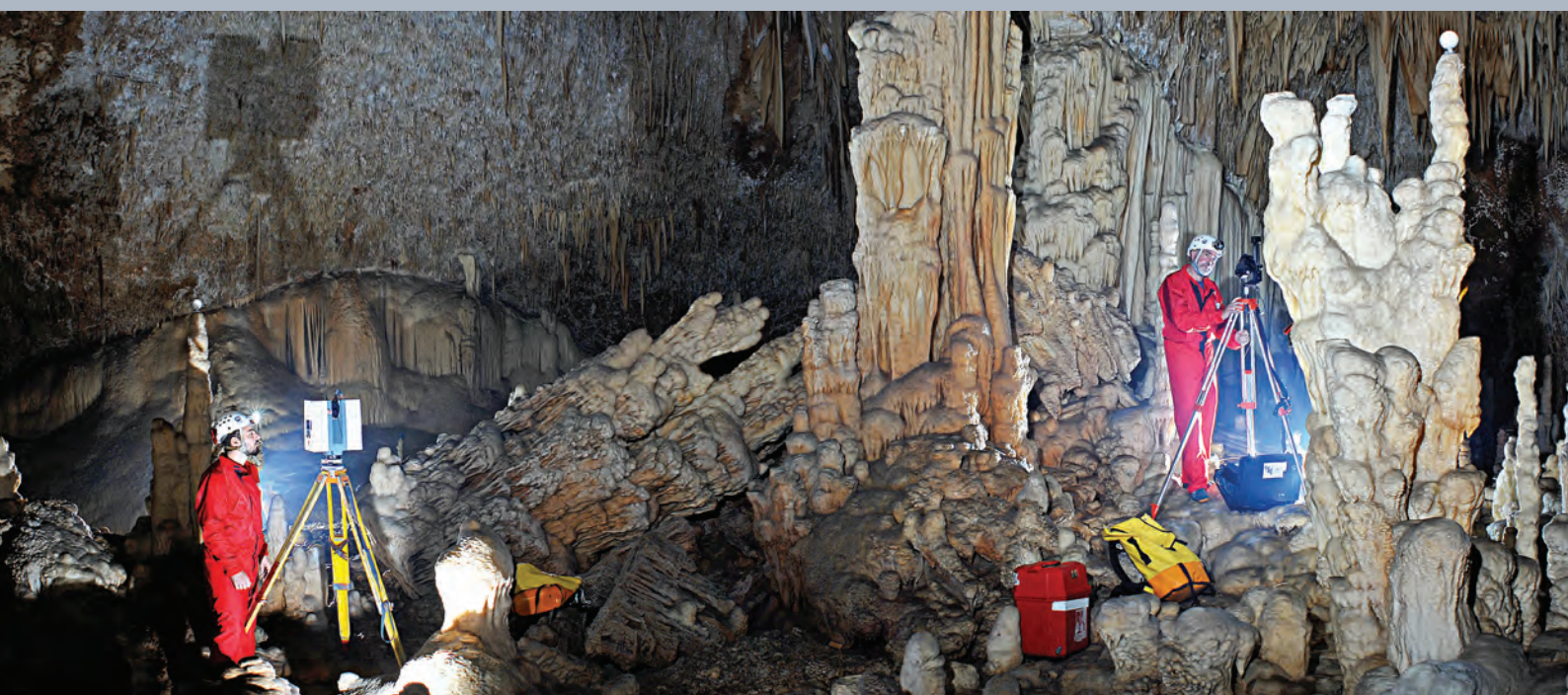
- ASTRADE L., PLOYON E., VEYRAT-CHARVILLON S., 2011. Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels - Retours d'expériences. *Collection EDYTEM*, 12, 107-118.
- BOUREAU J.-G., 2008. Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges. Application aux milieux forestiers et naturels. Edition IFN. 267 p
- CIGNONI P., CORSINI M., DELLEPIANE M., RANZUGLIA G., VERGAUWEN M., GOOL L.V., 2008. MeshLab and Arc3D: Photo-Reconstruction and Processing 3D Meshes. David Arnold, Franco Niccolucci, Daniel Pletinckx, Luc Van Gool (Editors). EPOCH Conference on Open Digital Cultural Heritage Systems, 1-6.
- DOWLING T.I., READ A.M., GALLANT J.C., 2009. Very high resolution DEM acquisition at low cost using a digital camera and free software. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009. <http://mssanz.org.au/modsim09>
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., 2011. Lasergrammétrie terrestre. *Collection EDYTEM*, 12, 11-28.
- FURUKAWA Y., CURLESS B., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2010. Towards Internet-scale Multi-view Stereo (CVPR 2010).
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2009. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereo (PAMI 2009), 1-14.
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 2010.
- LOURAKIS M.I.A., ARGYROS A.A., 2004. The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. ICS/FORTH Technical Report 340, Inst. Of Computer Science-FORTH, Heraklion, Crete, Greece. Available from <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>
- LOURAKIS M.I.A., ARGYROS A.A., 2009. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment. *ACM Trans. Math. Softw.* 36, 1, Article 2 (March 2009), 30 p. DOI = 10.1145/1486525.1486527, <http://doi.acm.org/10.1145/1486525.1486527>.
- PIERROT DESEILLIGNY M., CLERY I., 2011. Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Collection EDYTEM*, 12, 51-66.
- POLLEFEYS M., KOCH R., GOOL L.V., 1999. Self-Calibration and Metric Reconstruction In spite of Varying and Unknown Intrinsic Camera Parameters. *International Journal of Computer Vision*, 32, 1, 7-25.
- POLLEFEYS M., GOOL L.J.V., VERGAUWEN M., VERBIEST F., TOPS J., 2001. Image-based 3D acquisition of archeological heritage and applications, in D. ARNOLD, A. CHALMERS, D. FELLNER (eds.), VAST 2001 Conference Proceedings, Athens, ACM SIGGRAPH, 255-261.
- POLLEFEYS M., GOOL L.J.V., VERGAUWEN M., VERBIEST F., CORNELIS K., TOPS J., KOCH R., 2004. Visual Modelling with a Hand-Held Camera. *Int. J. Comput. Vision*, 59, 3, 207-232.
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2006. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH Conference Proceedings*.
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2007. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*.
- VERGAUWEN M., GOOL L.V., 2006. Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision and Applications*, 17, 411-426. Springer-Verlag. DOI 10.1007/s00138-006-0027-1
- ZHANG K., CUI Z., 2007. ALDPAT 1.0. Airborne LIDAR Data processing and Analysis Tools. National Center for Airborne Laser mapping. Florida International University.

SITOGRAFIE

- ARC 3D Webservice, A Family of Web Tools for Remote 3D Reconstruction. <http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3D/websevice/v2/index.php>
- DEWITT B.A., 1998. 3DCONF. <http://sfrc.ifas.ufl.edu/geomatics/wolfdewitt/download.html>
- GIRADEAU-MONTAUT D., 2007. CloudCompare. <http://rd.edf.com>
- MESHLAB : <http://meshlab.sourceforge.net/> - application Open Source développée à partir de 2005, basée sur des travaux du Visual Computing Lab of ISTI - CNR, Italie et dans le cadre du projet européen 3D-CoForm.

Applications

Travaux présentés à l'école thématique



Au recto :

Relevé lasergrammétrique dans les réseaux supérieurs de la grotte de Jeita (Liban). La numérisation des parois et des stalagmites est assurée par un LiDAR terrestre (à gauche). L'assemblage est assuré par des sphères (en haut à droite) dont la position est relevée au tachéomètre (à droite). L'objectif est ici d'étudier la géométrie du drain et la croissance des édifices stalagmitiques (stalactites et stalagmites). Photo : Stéphane Jaillet.

ÉTUDE DES CHANGEMENTS MORPHOLOGIQUES D'UNE RIVIÈRE EN TRESSES PAR LIDAR AÉROPORTÉ

LiDAR-DERIVED MORPHOLOGICAL CHANGES OF A BRAIDED RIVER IN THE FRENCH PREALPS

SANDRINE TACON ^{1,2}, FRÉDÉRIC LIÉBAULT ¹, HERVÉ PIÉGAY ²

¹ Cemagref de Grenoble, Unité de Recherche ETNA, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France.

² Université de Lyon, CNRS-UMR 5600, Site Ens Lyon, 15 Parvis R. Descartes, 69342 Lyon, France.

Contact : sandrine.tacon@cemagref.fr

RÉSUMÉ

Dans cette étude, des levés LiDAR aéroportés multi-temporels sont utilisés pour reconstruire les changements morphologiques d'une rivière en tresses liés à une crue de forte importance. Ces levés LiDAR ont été acquis sur la rivière du Bès, affluent de la Bléone (Préalpes du Sud) en octobre 2008 et en avril 2010. Au cours de cette période, une crue de récurrence 15 ans a été enregistrée en décembre 2009. Les données LiDAR ont été post-traitées selon différentes étapes. Premièrement, les données brutes ont été automatiquement classifiées en points « sol » et « sursol » avec le filtre d'Axellson de Terrascan, puis vérifiées manuellement (Sintegra). Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a ensuite été dérivé par triangulation (TIN) et interpolation linéaire. Les deux MNTs ont été soustraits pour obtenir une carte d'érosion et de dépôt. Dans cette dernière étape, les incertitudes sont évaluées selon des méthodes de calcul spatialement uniforme, à l'aide de points dGPS de référence. L'application d'une méthode de calcul d'erreurs spatialement variables, en fonction de la densité de points, de la pente, et de la rugosité du lit, est en cours d'étude. La carte d'érosion et dépôt permet de visualiser les changements morphologiques (érosion de berge, migration des chenaux...) liés à la crue et de calculer un budget sédimentaire positif de 47 091 m³ avec une erreur d'incertitude propagée uniforme.

MOTS-CLÉS : LiDAR AÉROPORTE, RIVIÈRE EN TRESSES, CRUE, CALCUL D'ERREUR D'INCERTITUDE.

ABSTRACT

The recent development of innovative topographic survey technologies offers new opportunities for investigating spatial and temporal patterns of gravel-bed rivers morphological responses to flow events. In this study, multirate airborne LiDAR surveys were used to reconstruct reach-scale morphological changes in a braided river following an important flood. LiDAR surveys were acquired for a 7 km reach of the Bès River, which is a tributary of the Bléone River in the Southern French Prealps. The Bès is a very active aggrading braided river (drainage area: 234 km²). LiDAR surveys were done in October 2008 and April 2010. During this period, a 15-year flood occurred in the Bès. LiDAR data were post-processed following several steps. First raw data were automatically classified into ground and no-ground points with the Axellson's automatic filter of the TerraScan software. Secondly DTMs (Digital Terrain Models) were constructed with ArcGIS using a simple workflow in which survey points were used to derive a triangular irregular network (TIN) using Delauney triangulation, which was then linearly resampled onto a 1 m² grid. Lastly a DEM of difference (DoD) is produced by subtraction of DTM pairs and DoD error was accounted with different methods recently developed. Scour and fill volume estimations are used to calculate sediment budgets. We showed that the braided channel of the Bès River underwent significant bank erosion, and channel scour and fill during the flood. The Bès River recorded a positive sediment budget of 47 091 m³, calculated by a subtraction of DTM pairs with a uniform propagated uncertainty.

KEYWORDS: AIRBORNE LiDAR, BRAIDED RIVER, FLOOD, UNCERTAINTY ERROR ASSESSMENT.

INTRODUCTION

L'étude de la morphologie fluviale a connu une récente avancée avec le développement de nouvelles technologies de mesures topographiques, basées sur des mesures terrestres (station totale, dGPS, LiDAR terrestre), aéroportées (LiDAR aérien), bathymétriques ou encore sur des techniques de télédétection (photogrammétrie). Ces nouvelles technologies permettent l'acquisition rapide de données topographiques à de fines résolutions spatiales et sur de grandes étendues spatiales. Ces données permettent de réaliser facilement

des Modèles Numériques de Terrain (MNT) de haute résolution. La réalisation de levés topographiques répétés permet de suivre les changements morphologiques et d'estimer le budget sédimentaire.

Ce document traite plus particulièrement de l'intérêt et de la faisabilité de l'utilisation de levés LiDAR aéroportés multi-temporels pour l'étude des changements morphologiques d'une rivière en tresses liés à une crue de forte importance.

I - PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

1 - Le bassin versant du Bès

La rivière du Bès est un affluent de rive droite de la Bléone, elle-même affluent de la Durance. Son bassin versant de 234 km² se situe au NNE de Digne-les-Bains. Elle s'écoule sur un linéaire de 38,8 km (Figure 1).

Après un passage dans des gorges (Clue de Barles), le cours d'eau présente un style en tresses, particulièrement actif dans les 6 à 7 km précédant la confluence avec la Bléone. C'est cette dernière partie à forte mobilité qui est étudiée. Sur ce secteur d'une longueur de 7 km, la pente du cours d'eau est de 1,4 %. La largeur moyenne de bande active est de 220 m, variant de 50 à 230 m (Genin, 2009).

Une étude diachronique d'évolution des profils en long a démontré que le secteur entre l'Escanglon et l'amont du levé LiDAR était en exhaussement entre 1911 et 2009 (Liébault *et al.*, 2009). Cet exhaussement témoigne d'un régime sédimentaire excédentaire, qui peut-être généralisé au secteur étudié. Les rivières en tresses au régime sédimentaire excédentaire sont très actives. Elles sont caractérisées par une forte emprise

de la bande active dans la plaine alluviale et des profils en travers avec des changements altitudinaux de faible importance (Liébault *et al.*, 2009).

Une station hydrologique de la DREAL est située en amont du secteur d'étude, au niveau de la commune d'Escanglon-Pérour. Les données hydrologiques sont disponibles depuis 1965. Le régime hydrologique est nivo-pluvial avec des hautes eaux printanières dues à la fonte des neiges (5 m³/s), un étiage estival (1,2 m³/s) et des hautes eaux automnales dues à des précipitations intenses (3,6 m³/s).

2 - Caractéristique hydrologique de la période d'étude

Entre les deux levés LiDAR, du 27/10/2008 et du 19/04/2010, la rivière du Bès a subi deux pics de crue successifs les 22 et 24 décembre 2009, de période de retour 15 et 20 ans respectivement (Figure 2). Les mesures de débit ne sont disponibles que pour la première crue car la station de mesure hydrologique a

été emportée lors de cette crue. Un débit maximum instantané de 171 m³/s a cependant pu être calculé par le LTHE par extrapolation de mesures en continu de la concentration de matières en suspension sur le secteur. Sur le reste de l'intervalle de temps entre les deux levés LiDAR, les débits sont restés faibles, avec des hautes eaux printanières d'intensité modérée. Les changements morphologiques observés sur cette période sont donc la conséquence principale de la crue de décembre 2009.

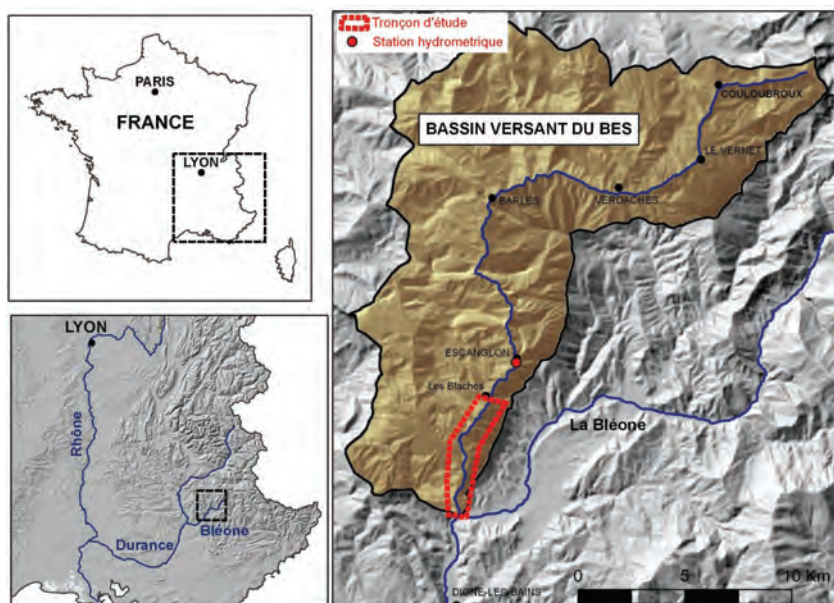


Figure 1 - Localisation du site d'étude.

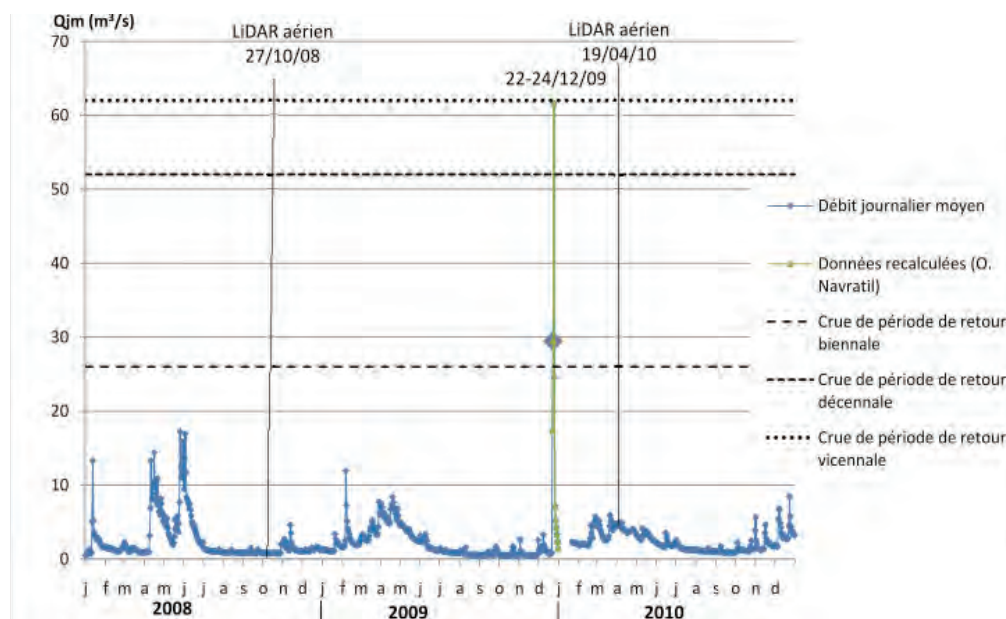


Figure 2 - Chronique hydrologique entre les levés LiDAR sur le Bès à la station d'Escanglon-Pérourre (Banque Hydro).

II - MÉTHODOLOGIE

1- Levés LiDAR

Des levés LiDAR aéroportés ont été réalisés sur la rivière du Bès en octobre 2008 et en avril 2010 par la société Sintegra. Les spécifications techniques des levés LiDAR sont décrites dans le Tableau 1.

Lors des levés LiDAR, Sintegra réalise des mesures topographiques terrestres au dGPS sur des surfaces de contrôle. Ce sont des zones planes et horizontales, dépourvues de couverture végétale, d'une surface de l'ordre de 25 m². Un maillage de points est levé au sol avec un pas régulier de 1 à 2 m (Sintegra, 2010). La différence d'altitude entre les points LiDAR et ceux de la surface de contrôle permet d'estimer une précision des points laser. Cette précision s'élève à 10 cm (écart type) en 2008 et 5 cm (écart type) en 2010.

2 - Traitement des données LiDAR

Les données LiDAR ont été post-traitées en deux étapes : la filtration de la végétation et la construction d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Les données brutes du levé LiDAR ont été traitées par Sintegra. Le nuage de points bruts est classé en «points sol» et «sursol» avec le filtre automatique d'Axellson du logiciel TerraScan. Le principe du filtre d'Axellson est la construction itérative d'un modèle de surface triangulé (Triangular Irregular Network : TIN). Un premier TIN clairsemé est construit à partir des points les plus bas, qui sont situés de manière certaine sur le sol. Ce TIN est progressivement densifié avec les autres points. A chaque itération, un point est ajouté au TIN s'il respecte certains critères par rapport au triangle dans lequel il se trouve. L'angle du point avec le triangle et la distance du point avec le nœud le plus proche doivent être inférieurs à certains seuils. Ces seuils sont recalculés à la fin de chaque itération. Ils sont basés sur la valeur médiane des histogrammes des deux critères à chaque itération (Sithole et Vosselman, 2004). La classification automatique de TerraScan est ensuite contrôlée manuellement. Ce contrôle manuel se fait en générant un TIN en teintes hypsométriques avec le logiciel TerraModeler. Les erreurs sont identifiées et corrigées de manière interactive (Sintegra, 2008, 2010).

Les MNT ont été construits dans ARCGIS en créant des TIN selon la triangulation de Delauney à partir du nuage de «points sol», puis des points sont échantillonnés linéairement sur la facette des triangles en une grille de 1 m².

Date	27/10/2008	19/04/2010
Appareil	Riegl LMS Q560	Leica ALS60
Nombre d'échos utilisé	2	-
Hauteur de vol	460 m	700 m
Vitesse de vol	50 m/s, 100 nœuds	110 nœuds
Fauchée/largeur de bande	520 m	380 m
Recouvrement latéral	60 %	30 %
Fréquence des impulsions laser	200 kHz	116 kHz
Angle de scannage	+ 29,5° / - 29,5° = 59°	+ 15° / - 15° = 30°
Précision des points laser (écart-type)	10 cm	5 cm
Pression planimétrique des points laser	15 cm	15 cm
Densité de points laser	5,4 points/ m ²	8 points/ m ²

Tableau 1 - Spécifications techniques des levés LiDAR (Sintegra, 2008, 2010).

3 - Calcul du bilan sédimentaire à l'échelle du tronçon

La soustraction du MNT de 2010 avec celui de 2008 sur une base de cellule par cellule (1 m²) permet de calculer la différence d'altitude entre les deux dates. Les volumes érodés et déposés peuvent ainsi être estimés pour calculer le bilan sédimentaire.

Lors de cette étape, une estimation de l'erreur d'incertitude des changements d'altitude observés est nécessaire. Un grand nombre de facteurs peuvent introduire des erreurs dans les MNT incluant la qualité du levé des points, la stratégie d'échantillonnage, la composition de la surface, la complexité de la topographie et les méthodes d'interpolations (Milan *et al.* 2011). Les premières méthodes se sont basées sur une estimation uniforme de l'erreur individuellement pour chaque MNT à l'aide de points de contrôle, calculant ainsi une erreur quadratique moyenne (RMSE) (Brasington *et al.*, 2000 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003 ; Milan *et al.*, 2007). Brasington *et al.* (2003) ont démontré que cette erreur individuelle peut ensuite être propagée dans la soustraction des 2 MNT selon la formule suivante :

$$\delta u_{DoD} = \sqrt{(\delta z_{new})^2 + (\delta z_{old})^2}$$

Où δu_{DoD} est l'erreur propagée dans la soustraction des 2 MNT

et δz_{new} et δz_{old} sont les erreurs individuelles du MNT récent et du MNT ancien

L'erreur propagée définit le seuil minimum de détection des changements d'altitude (minLoD), au dessous duquel les différences altitudinales sont rejetées ou un poids plus faible leur est attribué. Brasington *et al.* (2003) et Lane *et al.* (2003) y ont appliqué un intervalle de confiance.

Milan *et al.* (2011) ont démontré que de cette approche uniforme résultait des volumes d'érosion et de dépôts sous et/ou sur-conservateurs et des interprétations de processus incorrects. En effet, de nombreux auteurs ont démontré plus tard que les erreurs des MNT sont spatialement variables. Les surfaces qui sont soit pentues, soit qui ont une faible densité de points ou une forte rugosité, ont une incertitude d'altitude forte ; contrairement aux surfaces planes, avec une forte densité de points et régulière, qui ont une faible incertitude d'altitude (Wheaton *et al.*, 2010). Elles ont tendance à être plus élevées aux ruptures de pente, comme les limites de bancs et de berges (Heritage *et al.*, 2009). Ainsi les méthodes d'estimation uniforme de l'incertitude rejettent trop d'informations dans les zones où l'incertitude est faible et pas assez où l'incertitude est forte.

Les méthodes estimant une erreur spatialement distribuée sont limitées. Les premières études se limitaient à une erreur variant spatialement seulement sur la base des surfaces en eau ou assec (Brasington *et al.*, 2003 ; Lane *et al.*, 2003, 2007). Puis Heritage *et al.* (2009) ont proposé des courbes combinant les erreurs de levé et

d'interpolation avec la variabilité topographique locale. L'amplitude de l'erreur d'altitude montre une forte dépendance avec la variabilité de la topographie, et la nature de la relation dépend de la stratégie du levé et du processus d'interpolation.

Wheaton *et al.* (2010) ont présenté une nouvelle méthode de calcul de l'incertitude spatialement variable basée sur la théorie des ensembles flous et sur la cohérence spatiale des unités spatiales en utilisant le théorème de Bayes. Cette méthode a été développée à partir de données de GPS cinématique temps réel et de station totale sur une rivière en tresses, la Feshie (Ecosse). L'incertitude est calculée à partir de données telles que la densité des points, la pente, et d'informations additionnelles comme la rugosité ou la qualité des points du GPS. Ces données sont entrées dans un système d'inférence flou (FIS) où les règles sont définies par l'opérateur. Le calcul d'incertitude est réalisé cellule par cellule. Wheaton *et al.* (2010) ont complété cette approche par un filtre de cohérence spatiale des unités d'érosion et de dépôt. Ce filtre compte les cellules en érosion et en dépôt dans une fenêtre mouvante et calcul un indice de contiguïté spatiale, qui est transformé en probabilité. Ces deux méthodes peuvent être mixées en utilisant le théorème de Bayes, avec lequel la première probabilité est mise à jour à l'aide d'information additionnelle pour calculer une probabilité conditionnelle incorporant les deux mesures.

Milan *et al.* (2011) ont récemment développé, à partir des travaux d'Heritage *et al.* (2009), une nouvelle approche qui estime l'erreur spatialement distribuée dans un MNT, à travers une estimation de la relation entre la déviation standard de l'erreur d'altitude et la rugosité topographique locale. L'erreur d'altitude correspond à la différence d'altitude entre les points du nuage de points brut et le MNT. Il en découle un seuil minimum de détection des changements d'altitude spatialement distribué.

Dans cette étude, pour chaque DEM, une erreur d'incertitude uniforme a été calculé de 10 cm pour 2008 et 5 cm pour 2010, qui correspond à l'écart type de la différence entre les points LiDAR et les points dGPS de référence. Ces erreurs ont été propagées dans le MNT de différence entre les altitudes de 2008 et 2010 avec la formule 1. L'erreur propagée s'élève à 11,8 cm. Cette erreur d'élévation n'est pas à négliger car les changements morphologiques dans les rivières peuvent être de cet ordre de grandeur. Cependant, sur le Bès, les changements morphologiques survenus pendant les deux crues sont en moyenne supérieures à ce seuil (40 cm) et par conséquent la perte de données liée à cette erreur d'incertitude est négligeable.

Des mesures dGPS sur le Bès sont prévues afin de caractériser l'influence des états de surface (pente, rugosité, végétation, surface en eau) sur les levés LiDAR et de pouvoir calculer une erreur d'incertitude spatialement variable en suivant la méthode de Wheaton *et al.* (2010).

III - RESULTATS

La rivière du Bès a subi des changements morphologiques significatifs pendant la crue de décembre 2009 (Figures 3 et 4). Des processus morphologiques sont clairement observables comme des érosions de berge, des dépôts, des migrations de chenal principal.

Une cartographie de la soustraction brute des 2 MNT présente des changements morphologiques sur l'ensemble du tronçon avec un fort pourcentage surfacique de changement faible (-10 à 10 cm). La significativité de ces faibles changements peut être mise en doute car des zones de terrasse et des zones fortement végétalisées sont concernées. Ces faibles changements peuvent être attribués aux erreurs individuelles des MNT liées à la technique du LiDAR aéroporté, au filtrage de la végétation, à la construction des MNT. Sans estimation de l'erreur d'incertitude, le bilan sédimentaire s'élève à 52 861 m³.

L'application d'une limite de détection de 0,118 m, calculée par un calcul d'incertitude uniforme, permet de soustraire ces zones douteuses et de calculer un bilan sédimentaire plus faible de 47 091 m³. Durant cette crue, le bilan sédimentaire du Bès est donc positif.

Cette méthode de calcul d'erreur spatialement uniforme présente plusieurs limites. D'une part les surfaces de contrôle ne sont pas représentatives de la bande active : absence de végétation, surface lisse, absence de rupture de pente. De plus, cette méthode ne permet pas de prendre en compte la variabilité de la densité des points du levé LiDAR.

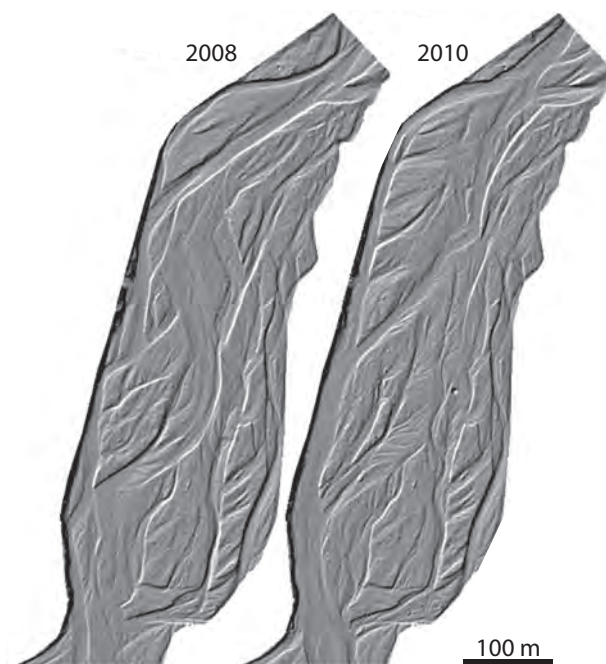
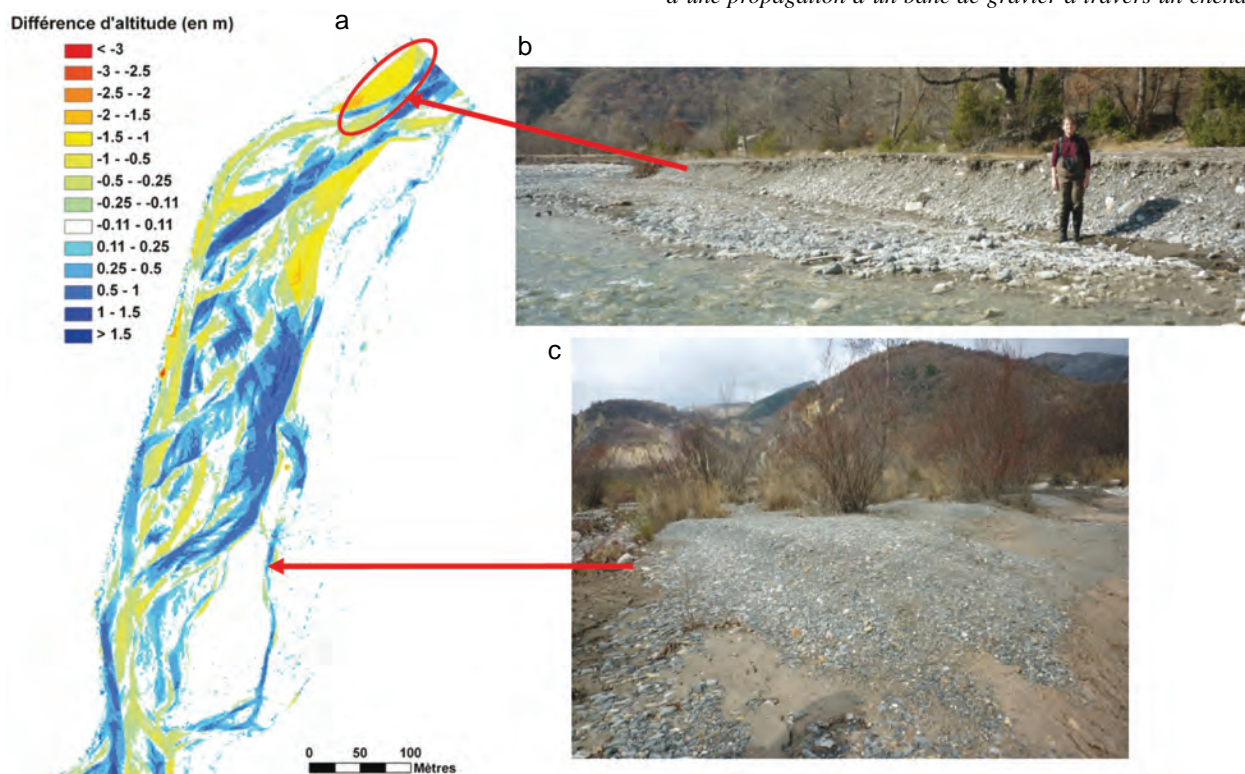


Figure 3 - MNT ombragés du Bès en 2008 et 2010 (exemple du secteur amont).

Figure 4 - a) MNT de la différence d'altitude de la rivière du Bès entre 2008 et 2010 sur le secteur amont (avec une limite de détection de 0,118 m) ; b) et c) Validation par des photographies de terrain : exemple d'une érosion de berge et d'une propagation d'un banc de gravier à travers un chenal



CONCLUSION

Le LiDAR aéroporté multi-temporel semble être un bon outil pour reconstruire les changements morphologiques d'une rivière en tresse liés à des crues de forte importance. En effet, les changements morphologiques survenus pendant les deux crues sont globalement supérieurs à l'erreur d'incertitude, calculée de manière uniforme sur tout le MNT. Cependant, de nombreux auteurs ont démontré que les erreurs d'incertitude étaient distribuées selon les caractéristiques de la surface du sol (rugosité, pente, végétation, eau...) et du levé LiDAR (variabilité de la densité de points). Ainsi pour affiner la compréhension de certains processus morphologiques comme l'érosion des bancs ou des berges, d'autres travaux sont en cours pour mettre en œuvre un calcul d'incertitude spatialement variable à partir d'une campagne de points de contrôle au dGPS effectués sur des surfaces aux caractéristiques diffé-

rentes en terme de pente, de rugosité, de végétation et de présence d'eau.

L'objectif final de ce travail est d'utiliser ces levés LiDAR multi-temporels pour étudier les réponses morphologiques à une échelle plus fine des formes du lit. La méthodologie utilisée s'oriente vers une cartographie des macroformes, une étude des changements de la morphologie des sections en travers entre les deux crues et une étude des réseaux de chenaux.

Cette étude confirme de plus que le Bès est une des dernières rivières des Alpes françaises ayant encore un tressage encore actif et un bilan sédimentaire positif. En effet, ce style fluvial est devenu peu fréquent en raison d'une réduction régionale des sédiments délivrés (Liébault *et al.*, 2010). Ce site est par conséquent un terrain favorable pour l'étude des changements morphologiques des rivières en tresses.

Remerciements

Cette recherche est financée par le projet ANR Risknat « GESTRANS » et le projet EC2CO-CYTRIX du CNRS-INSU.

BIBLIOGRAPHIE

- BRASINGTON J., RUMSBY B.T., MAC VEY R.A., 2000. Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Processes and Landforms*, 25, 973-990.
- BRASINGTON J., LANGHAM J., RUMSBY B., 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53, 299-316.
- GENIN J.-R., 2009. Application de la télédétection pour la caractérisation des changements géomorphologiques d'une rivière en tresses. Rapport de Master, Université de Provence, Aix-en-Provence, 21 p.
- HERITAGE G.L., MILAN D.J., LARGE A.R.G., FULLER I.C., 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112, 334-344.
- LANE S.N., WESTAWAY R.M., HICKS D.M., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 249-271.
- LIÉBAULT F., CASSEL M., JANTZI H., TACON S., TALASKA N., 2010. Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes, Cemagref, 28p.
- MILAN D.J., HERITAGE G.L., HETHERINGTON D., 2007. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1657-1674.
- MILAN D.J., HERITAGE G.L., LARGE A.R.G., FULLER I.C., 2011. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation. *Geomorphology*, 125, 160-171.
- PIÉGAY H., ALBER A., SLATER L., BOURDIN L., 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71, 371-388.
- PIÉGAY H., BELLETTI B., LIÉBAULT F., 2009. Typologie de rivières en tresses du bassin RMC. *ZABR*, 101.
- SINTEGRA, 2008. Levé topographique par laser aéroporté (LIDAR) sur le lit de la rivière Bléone. Rapport d'acquisition des données laser, non publié, 8 p.
- SINTEGRA, 2010. Levé topographique par laser aéroporté (LIDAR) sur la Bléone, Rapport de campagne LiDAR, non publié, 9 p.
- WHEATON J.M., BRASINGTON J., DARBY S.E., SEAR D.A., 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136-156.

MISSION D'ACQUISITION AÉRIENNE LIDAR POUR DES APPLICATIONS THÉMATIQUES EN ÉCOLOGIE DU PAYSAGE LE CAS DES COTEAUX DE GASCogne

ACQUISITION MISSION OF AIRBORNE LiDAR FOR THEMATIC APPLICATIONS IN LANDSCAPE ECOLOGY: THE CASE OF THE COTEAUX DE GASCogne

SYLVIE LADET ¹, DAVID SHEEREN ², MATHIEU FAUVEL ², WILFRIED HEINTZ ^{1,3}, MARC DECONCHAT ¹

¹ INRA, UMR 1201 Dynamiques et Ecologie des paysages agriforestiers DYNAFOR, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan, France.

² Université de Toulouse, ENSAT, UMR 1201 DYNAFOR, 31326 Castanet-Tolosan, France.

³ GIP ECOFOR, 42, rue Scheffer, 75116 Paris Cedex 16, France.

Contact : sylvie.ladet@toulouse.inra.fr

RÉSUMÉ

Les recherches en écologie du paysage du laboratoire de recherche DYNAFOR à Toulouse visent à comprendre les relations entre la composition du paysage, son évolution et la biodiversité des agroécosystèmes. Des nouveaux travaux menés dans le cadre des enjeux liés à la protection des cultures ou à la conservation de la biodiversité ont mis en avant l'importance des éléments semi-naturels de faible superficie (haies, bandes enherbées, arbres isolés, fragments boisés, ripisylves, lisières) dans la dynamique des espèces étudiées. Dans le but d'être capable de produire des données spatiales plus adaptées aux besoins des recherches engagées, l'unité a décidé de réaliser une mission d'acquisition d'images à très haute résolution spatiale et spectrale par moyens aéroportés. Des mesures altimétriques très fines ont été effectuées à l'aide d'un système d'un LiDAR topographique. Deux principaux produits ont été dérivés du semis de points bruts : un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 1 m de résolution spatiale représentant le relief et fournissant l'altitude du terrain, et un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) représentant l'enveloppe externe du terrain (incluant le sursol) et permettant ainsi de calculer la hauteur des objets (forêts, haies, etc.) et de construire un modèle de hauteur de la canopée. Quelques premiers résultats de profils sur des fragments boisés suivis par Dynafor sont présentés ici et ouvrent de nouvelles perspectives pour étudier les potentialités d'une cartographie précise de la composition et de la structure (y compris verticale) de certaines forêts étudiées. Ces données seront mises en relation avec la diversité de différentes communautés d'espèces animales ou végétales.

MOTS-CLÉS : LiDAR AÉRIEN, TRÈS HAUTE RÉOLUTION SPECTRALE, MNT, MNE, FORÊT, ÉCOLOGIE DU PAYSAGE.

ABSTRACT

Research in the landscape ecology done by DYNAFOR research laboratory aims at understanding the relationships between the composition of the landscape, its evolution and biodiversity in agroecosystems. New issues related to the protection of crops or the conservation of biodiversity have highlighted importance of the semi-natural small elements (hedges, grass strips, isolated trees, woodland fragments, riparian forests, forest edges) in ecological dynamics of studied species. To be able to produce data more adapted to the needs of the research we carried out a mission to acquire images at very high spatial and spectral resolution by airborne captor. Very fine elevation measurements have been made using a topographic LiDAR system. Two main products were derived from the raw points seedlings: a digital terrain model (DTM) at 1 meter spatial resolution representing terrain and providing the altitude of the land, and a digital elevation model (DEM) representing the outer envelope of the field and to calculate the height of objects (forests, hedges, etc.) and build a model of canopy height. A few first results of profiles on woodland fragments studied by Dynafor are presented here and open new opportunities to study the potential of a precise mapping of the composition and structure (including vertical) studied forests.

KEYWORDS : AIRBORNE LiDAR, VERY HIGH SPECTRAL RESOLUTION, DTM, DEM, FOREST, LANDSCAPE ECOLOGY.

INTRODUCTION

L'écologie du paysage est une science intégratrice des relations homme-nature et une science utile pour l'aide à la décision pour la gestion des ressources naturelles. Elle s'appuie sur des données spatialisées représentant les activités humaines et les caractéristiques écologiques des milieux. La disponibilité de ces données s'est accrue très fortement et très rapidement dans les dernières années. Elles offrent des opportunités pour aborder plus finement et avec plus d'efficacité des questions cruciales pour l'avenir des territoires ruraux et la conservation des ressources naturelles. La préservation de la biodiversité des forêts rurales est un des enjeux qui bénéficie fortement de ces progrès de la géomatique en donnant

accès à des informations nouvelles nécessaires à une meilleure compréhension et une meilleure gestion des processus écologiques concernés. La caractérisation fine des structures arborées, en 3 dimensions, s'avère ainsi une amélioration majeure pour modéliser les relations entre les pratiques sylvicoles, qui induisent cette structure, et la biodiversité, qui dépend de cette structure. Les données issues du LiDAR ouvrent de nouvelles perspectives de développement de l'écologie du paysage appliquée à la gestion des ressources naturelles dans les paysages ruraux. Nous présentons dans cet article un aperçu de ces possibilités dans le cadre des travaux conduits sur un site d'étude écologique à long terme.

I - CONTEXTE

Dynafor est une unité mixte de recherche INRA-INP/ENSAT/EI Purpan, pluridisciplinaire regroupant chercheurs et enseignants-chercheurs dans le domaine de l'écologie, discipline dominante de l'unité, des biotechniques (foresterie, zootechnie des systèmes d'élevage), de la modélisation informatique et de la géomatique (SIG et télédétection). Elle s'est engagée dans le développement de recherches qui s'inscrivent résolument dans le champ d'une écologie du paysage «pour l'action», c'est-à-dire tournée vers la finalisation des acquis de la recherche pour répondre à des attendus de la société en termes de gestion des ressources naturelles. Dans ces travaux, le paysage est considéré comme le fruit d'une coévolution entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques à des échelles spatiales et temporelles multiples qui correspondent aux différents niveaux d'organisation des processus étudiés (Allen et Starr, 1982 ; Balent, 1996). Un des terrains d'étude de Dynafor, les Coteaux et Vallées de Gascogne, est une plateforme LTSER (Long Term Socio-Ecological Research numéro d'enregistrement LTER_EU_FR_003) depuis 2007. C'est un label lancé en 1980 par la National Science Foundation aux Etats-Unis. Le but est de mettre en réseau des sites de recherche à long terme, dans des écosystèmes importants et sensibles à travers le monde. Il en résulte une grande quantité de données de natures diverses qu'il convient de structurer informatiquement. Une des caractéristiques les plus importantes de ce label est le développement de bases de données géographiques contenant des informations sur des données de type écologiques, socio-techniques et sur les conditions environnementales (occupation des sols, climat, relief...) sur les sites étudiés.

Le site des Coteaux de Gascogne est un paysage rural à vocation agricole situé à 80 kilomètres de Toulouse dans la région du Bas-Comminges. Cette zone est vallonnée, d'une altitude comprise entre 200

et 400 m, couvrant 250 km², avec une matrice agricole de polyculture-élevage, marquée par la présence de nombreux bois fragmentés et d'éléments linéaires boisés de type haie, alignement d'arbres, et un habitat dispersé (Deconchat *et al*, 2007). Ce terrain est l'objet, depuis les années 1980, de nombreuses études menées in situ et répétées sur l'évolution de la biodiversité des communautés végétales et animales (insectes, oiseaux), et sur l'évolution des pratiques de gestion des exploitations agricoles et forestières.

Des nouveaux travaux menés dans le cadre des enjeux liés à la protection des cultures ou à la conservation de la biodiversité patrimoniale ont mis en avant l'importance des éléments semi-naturels de faible superficie (haies, bandes enherbées, arbres isolés, fragments boisés, ripisylves, lisières, talus, fossés...) dans la dynamique intra-annuelle des espèces étudiées (Roume *et al*, 2011). La structure spatiale en 3 dimensions des forêts rurales, dont la gestion est très variée, détermine de nombreux processus écologiques liés notamment à la disponibilité en lumière arrivant au sol, mais aussi l'encombrement volumique qui influe sur les possibilités d'utilisation de l'espace par des espèces comme les oiseaux, ou la présence de micro-habitats dans lesquels peuvent se développer des espèces ayant une valeur patrimoniale élevée.

Par leur très haute résolution spatiale et leur capacités à rendre compte de donnée en 3 dimensions, les données LiDAR permettent de produire un modèle numérique de terrain distinguant le sol (dont les micro-reliefs) et le sursol (dont la topographie de la canopée) ce qui offre une large gamme de possibilités d'applications, notamment en écologie du paysage (Cochrane, 2000 ; Vierling *et al*, 2008). On peut mentionner l'utilisation de ce type de données pour la création de cartes d'habitat d'espèces faunistiques et floristiques (Hyde *et al*, 2006), la modélisation des relations entre la présence de différentes espèces d'oiseaux et la

structure verticale des milieux (Davenport *et al.*, 2000 ; Bradbury *et al.*, 2005), la caractérisation de la structure des forêts (densité, hauteurs des arbres, diamètre...) et leur mode de gestion associé (Dubayah *et al.*, 2000). Cependant, malgré ces premières expériences, l'usage

des données LiDAR dans le cadre de l'écologie du paysage, pour caractériser des structures et des objets pertinents pour la gestion de la biodiversité, reste un domaine d'application peu développé et pour lequel des progrès méthodologiques sont nécessaires.

II - ACQUISITION DES DONNÉES

Les mesures de données altimétriques ont été effectuées à l'aide d'un système laser à impulsion, le Riegl LMS-Q560 en juillet 2010. Il s'agit d'un LiDAR topographique capable de fonctionner selon deux modes d'acquisition différents : enregistrement de plusieurs réflexions de chaque impulsion avec la surface des objets au sol (LiDAR à retour discret) et enregistrement de la totalité de la forme d'onde retour (LiDAR à retour d'onde complète). L'acquisition des données dans les Coteaux s'est faite selon les deux modes, avec un nombre maximal de quatre échos enregistrés par impulsion émise pour le système à retour discret (1^{ère} réflexion, dernière réflexion et deux échos intermédiaires) (Figure 1). La densité moyenne de points acquis est de 4 points par m² pour une fréquence des impulsions de 70 kHz. La précision des données est inférieure à 40 cm en planimétrie et 20 cm en altimétrie. Dans le cas d'un survol d'une zone forestière, les impulsions sont reflétées par la surface du feuillage mais peuvent pénétrer jusqu'au sol. Le produit final est alors un nuage de points 3D géoréférencés décrivant la topographie terrestre (ensemble « sol » + « sur sol »).

Deux principaux produits ont été dérivés du semis de points bruts (par filtrage et interpolation sous le logiciel *Global Mapper*) : un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 1 m de résolution spatiale représentant le relief et fournissant l'altitude du terrain, et un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) représentant l'enveloppe externe du terrain (incluant le sur-sol) et permettant ainsi de calculer la hauteur des objets (végétation, bâtiments...) et de construire un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) de la canopée. De plus à partir du MNT, de nombreuses informations comme par exemple les caractéristiques géomorphologiques et géoclimatiques (pente, orientation, zone de visibi-

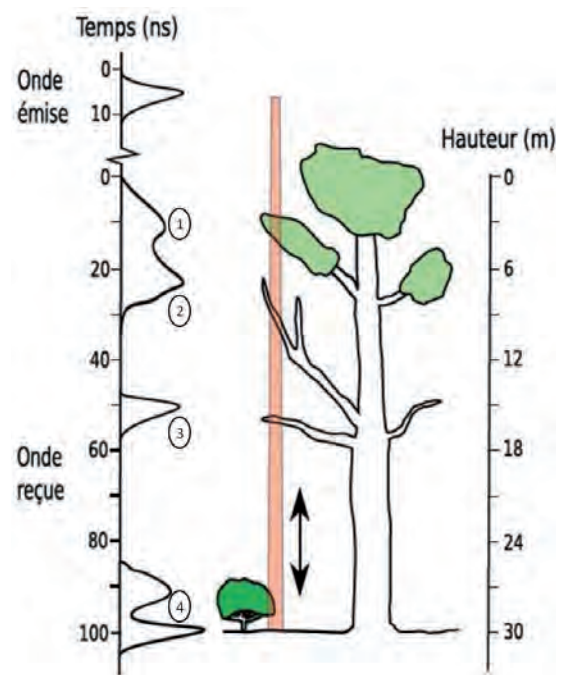


Figure 1 - Ondes laser émises et reçues sur une zone de végétation complexe. Tous les objets suffisamment résolus spatialement contribuent à la forme de l'onde via le retour des 4 échos (1, premier retour ; 2 et 3, retours intermédiaires ; 4, dernier retour).

lité) peuvent être dérivées et reliées à la hauteur des peuplements (Gachet, 2009). Pour les Coteaux, nous avons couvert 118 km² (ce qui équivaut à 12 gigaoctets de données) qui ont été découpés en 194 dalles de 1 km x 1 km selon un tableau d'assemblage régulier. Par exemple, la dalle dite de « La Broquère » est constituée de 3 600 000 points bruts (Figures 2, 3 et 4).

III - PREMIERS EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS SUR LES ÉLÉMENTS BOISÉS

Nous avons focalisé notre attention sur la représentation des éléments boisés (bois, haies) dans ces données LiDAR (Figures 1 et 2) car elles sont au cœur des questions de recherche en écologie concernant la biodiversité des paysages ruraux et la caractérisation des structures forestières est particulièrement difficile dans ces types de forêts.

Dans les Coteaux de Gascogne, les petits bois, d'une surface de 0,5 à 35 ha, appartiennent à un grand nombre de propriétaires privés locaux, souvent des exploitants agricoles, qui les gèrent eux-mêmes. La plupart des parcelles boisées sont des mélanges de chênaie-charmaie, traitées en taillis-sous-futaie ou plus rarement en taillis, utilisées principalement pour le bois de feu et

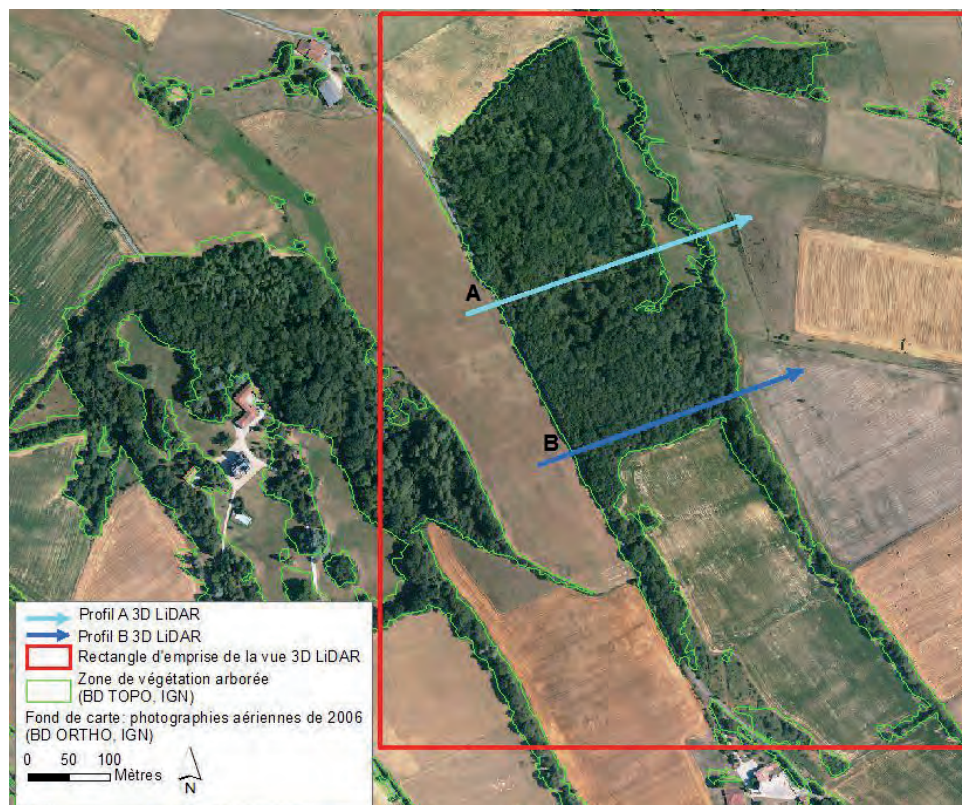
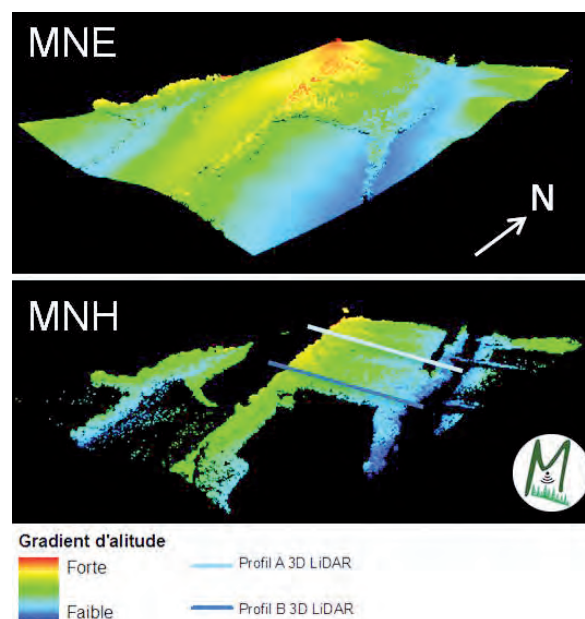


Figure 2 - Illustration de la dalle de test, sous le logiciel ArcGis, avec localisation de l'emprise 3D LiDAR et des 2 profils transversaux.

Figure 3 (ci-dessous) - Vue 3D du rectangle d'emprise du MNE (en haut) et MNH (en bas) représentant la topographie de la canopée du bois de La Broquère sous le logiciel LP360, fonctionnant dans l'environnement ArcGis. Le logo représente la mission d'acquisition couplée de données LiDAR et hyperspectrale par capteurs aéroportés (projet MADONNA) réalisée en juillet 2010 financée par l'INRA et l'INP.

les réserves de bois d'œuvre. Les arbres sont coupés et débordés en quelques mois et la coupe est laissée sans autre intervention notable jusqu'à ce que les arbres soient de nouveau exploitables, quinze à quarante ans plus tard (Andrieu *et al*, 2008). La structure verticale est complexe (multistrate) et diverse en composition spécifique du fait qu'un bois peut appartenir à plusieurs propriétaires et que la gestion forestière n'est pas assujettie à un plan de gestion strict, comme c'est le cas pour les forêts publiques. La reconstitution de l'historique des pratiques de coupe dans ces bois (du Bus de Warnaffe *et al*, 2006) montre que les exploitations sont variables d'un propriétaire à un autre et que pour un même propriétaire ces exploitations se répètent sur des surfaces qui ne sont pas les mêmes d'un cycle de coupe à l'autre. Cela conduit à une juxtaposition de petites unités spatiales ayant subi des histoires d'exploitation différentes. Ces pratiques sont sources d'une forte hétérogénéité interne. Nous posons alors le postulat que les coupes effectuées pour l'exploitation du bois influent à long terme sur la composition des communautés forestières et la préservation de la biodiversité.

Par ailleurs d'autres éléments boisés comme les haies, les alignements d'arbres, ont une fonction écologique reconnue au-delà de l'aspect paysager (Baudry *et al*, 2003). En effet, la présence de haies vives limite le ruissellement et la diffusion des pesticides, favorise l'infiltration de l'eau et la régulation de crues, retient la terre et diminue les effets d'érosion des sols. La haie est aussi un refuge pour de nombreuses espèces (auxiliaires) et participe à la formation de corridors biologiques.



La topographie du terrain de cette zone est caractéristique de la configuration d'un coteau. Le bois s'étale le long du versant Est du coteau. L'observation du MNH permet de repérer des différences dans les hauteurs d'arbre de ce bois de 10 hectares et de visualiser le réseau de haies qui lui est connecté.

Dans les 2 profils, on constate que le bois s'étale le long d'un gradient altitudinal allant de 300 à 330 m avec une hauteur d'arbre maximale de l'ordre de 25 m. Le profil A met en évidence une rupture dans la structure

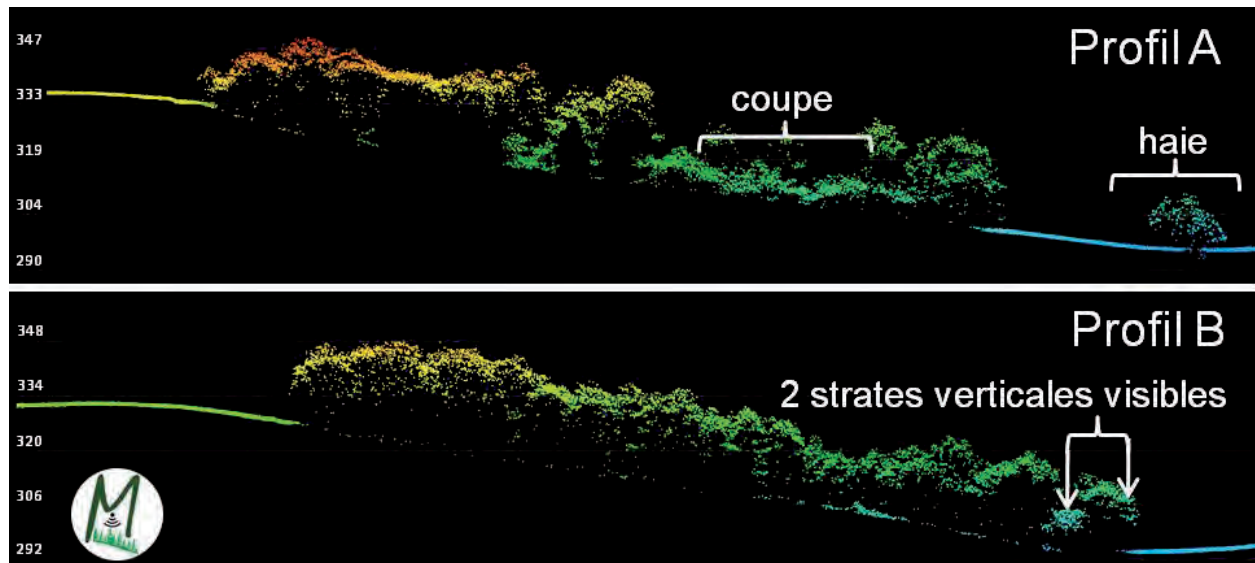


Figure 4 - Profils en travers du semis de points sur le bois de la Broquère chez 2 propriétaires du bois obtenus avec le logiciel LP360.

verticale de la canopée qui est dû à une coupe récente. Par contre le profil B met en évidence une canopée continue sur cette zone avec des différences de hauteur d'arbre et une stratification verticale en 2 strates (10 m et 25 m), surtout dans la partie basse du coteau, la partie haute montrant une structure plus régularisée, mono-

strate, qui correspondrait à une gestion en futaie. On constate en outre que du fait de la densité de la végétation, le profil du sol n'est pas accessible en détail avec les données acquises, sans un traitement particulier qui consisterait à exploiter les points longitudinalement pour interpoler les données manquantes.

CONCLUSION

Le système LiDAR permet de produire finement un modèle numérique de terrain et d'élévation distinguant la topographie à la surface des sols et la topographie de la canopée, la hauteur de la végétation étant ainsi déduite de ces mesures topographiques. Nous prévoyons d'exploiter le potentiel de ces données en étendant ces premières analyses aux autres bois compris dans la zone prospectée pour obtenir la structure verticale de ces forêts tout comme l'a fait Gachet (2009) sachant que la coupe est la principale pratique de gestion de cette forêt et qu'elle modifie la structure forestière verticale. Ces données seront mises en relation avec la diversité de différentes communautés d'espèces animales ou végétales étudiées à Dynafor.

Les données seront mises en relation avec des informations sur les pratiques de gestion des forêts et leur histoire afin de construire des modèles explicatifs et prédictifs des structures de végétation produites par la

gestion. Une attention particulière portera en outre sur les lisières dont les structures verticales sont complexes et difficiles à caractériser sur de grandes surfaces. Ainsi, nous avons déjà constaté que les arbres des lisières avec des prairies pâturées étendent leurs branches plus loin que ceux des lisières avec les cultures, ce qui peut avoir des conséquences importantes pour la biodiversité animale et végétale.

L'acquisition de ces données est essentielle pour compléter la base de données géographique relative au site des Coteaux de Gascogne et valider les résultats obtenus jusqu'à présent à partir de données spatiales à résolution plus grossière. La constitution de cette infrastructure de données comprenant des descriptions et des analyses des paysages à plusieurs grains d'analyse constitue une priorité pour l'unité suite à la labellisation de son site d'étude dans le réseau international d'études écologiques à long terme (réseau ILTER).

Remerciements

Ce travail a reçu le soutien financier de l'Institut National de la Recherche Agronomique (appel d'offre BDINRA 2010) et l'Institut National Polytechnique de Toulouse (appel d'offre BQR 2010).

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN T.F.H., STARR T.B., 1982. Hierarchy: Perspectives in Ecological Complexity. University of Chicago Press, Chicago, London.
- ANDRIEU E., DU BUS DE WARNAFFE G., LADET S., HEINTZ W., SOURDRIL A., DECONCHAT M., 2008. Cartographier l'historique des coupes forestières dans les petits bois. *Revue Forestière Française*, 60, 5, 667-676.
- BALENT G., 1996. La forêt paysanne dans l'espace rural. Biodiversité, paysages, produits. INRA, *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 29, 267 p.
- BAUDRY J., JOUIN A., 2003. De la haie aux bocages. Organisation, dynamique et gestion. Inra, *Collection Espaces ruraux*, 435 p.
- BRADBURY R.B., HILL R.A., MASON D.C., HINSLEY S.A., WILSON J. D., BALTZER H., ANDERSON G. Q.A., WHITTINGHAM M.J., DAVENPORT I.J., BELLAMY P.E., 2005. Modelling relationships between birds and vegetation structure using airborne lidar data: a review with case studies from agricultural and woodland environments. *Ibis*, 147, 443-52.
- COCHRANE M.A., 2000. Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 10, 2075-2087.
- DAVENPORT I.J., BRADBURY R.B., ANDERSON G.Q.A., HAYMAN G.R.F., KREBS J.R., MASON D.C., WILSON J.D., VECK N.J., 2000. Improving bird population models using airborne remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 13 et 14, 2705-2717.
- DECONCHAT M., GIBON A., CABANETTES A., DU BUS DE WARNAFFE G., HEWISON M., DE GARINE E. GAVALAND A., LACOMBE J.-P., LADET S., MONTEIL C., OUIN A., SARTHOU J.-P., SOURDRIL A., BALENT G., 2007. How to set up research framework to analyse socioecological interactive processes in a rural landscape. *Ecology and Society*, 12, 15. [ONLINE], URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art15>
- DUBAYAH R., DRAKE J.B., 2000. LiDAR remote sensing for forestry applications. *J. Forest*, 98, 6, 44-46.
- DU BUS DE WARNAFFE G., DECONCHAT M., LADET S., BALENT G., 2006. Variability of cutting regimes in small private coppice forests of south-western France. *Annals of Forest Sciences*, 63, 915-927.
- GACHET G., 2009. Analyse et exploitation des données LiDAR aéroportés pour la caractérisation des milieux boisés de la Suisse. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 278 p.
- HYDE P., DUBAYAH R., WALKER W., BLAIR B., HOFTON M., HUNSAKER C., 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM plus, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment*, 102, 63-73.
- ROUME A., DECONCHAT M., RAISON L., BALENT G., OUIN A., 2011. Edge effects on ground beetles (Coleoptera: Carabidae) at the woodlot-field interface are short-range and asymmetrical. *Agricultural and Forest Entomology*, doi: 10.1111/j.1461-9563.2011.00534.x
- VIERLING, K.T., VIERLING L.A., MARTINUZZI S., GOULD W., CLAWGES R., 2008. LiDAR: Shedding new light on habitat modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 2, 90-98.

NUMÉRISATION 3D DE LA GROTTES ORNÉE DES FRAUX

SAINT-MARTIN-DE-FRESSENGEAS, DORDOGNE, FRANCE

APPROCHE MULTISCALE

3D SCANNING OF THE ARCHAEOLOGICAL CAVE « LES FRAUX »

SAINT-MARTIN-DE-FRESSENGEAS, DORDOGNE, FRANCE

MULTI-SCALE APPROACH

ALBANE BURENS¹, PIERRE GRUSSENMEYER², SAMUEL GUILLEMIN², LAURENT CAROZZA¹,
RAPHAELLE BOURRILLON³, STÉPHANE PETROGNANI⁴

¹ UMR 5602 GEODE, Université Toulouse-le-Mirail, Maison de la Recherche, 5 allées A. Machado, 31058 Toulouse Cedex 1, France.

² UMR 7005 LSIT-TRIO, Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection, Strasbourg, France.

³ UMR 5608 TRACES, Université Toulouse-le-Mirail, Maison de la Recherche, 5 allées A. Machado, 31058 Toulouse cedex 1, France.

⁴ UMR 7041 ArScAn, Maison R. Ginouvès, 21 allée de l'Université, 92023 Nanterre Cedex, France.

Contact : albane.burens@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ

La grotte ornée des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne), vaste réseau de galeries ayant livré des vestiges d'une rare richesse (aménagements domestiques, dépôts de mobilier, manifestations pariétales, tous datés de l'âge du Bronze), a été scellée à la fin de l'âge du Bronze suite à l'effondrement de son porche d'entrée. L'étude du site est réalisée dans le cadre d'un SEEG de l'INEE, au sein duquel sont testées, de manière interdisciplinaire, de nouvelles méthodes d'acquisition de données. Dans ce cadre, un partenariat mis en place depuis 4 années entre archéologues et topographes de l'INSA a permis de conduire la numérisation 3D de la volumétrie totale du réseau et, en parallèle, l'acquisition en haute définition des panneaux ornés. L'objet de cet article est de mettre l'accent sur la complémentarité des données offertes par la multiplicité des échelles d'acquisition effectuées in situ, de dresser un premier bilan des différentes techniques testées dans ce cadre, et de poser les premiers jalons d'une réflexion sur la production d'une documentation adaptée aux besoins des partenaires de l'équipe de recherche.

MOTS-CLÉS : LASERGRAMMÉTRIE, PHOTOGRAMMÉTRIE, TOPOGRAPHIE, HAUTE RÉOLUTION, PDF-3D, ARCHÉOLOGIE, GROTTES ORNÉE, ÂGE DU BRONZE, DORDOGNE, FRANCE.

ABSTRACT

The archaeological cave « Les Fraux » (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne) forms a great network of galleries, characterized by the exceptional richness of its archaeological Bronze age remains such as domestic fireplaces, ceramic and metal deposits, fingerings incised in the clayey-walls. The cave has been closed according to the collapse of its entrance, at the end of the Bronze Age. The study in progress takes place in a new kind of tool founded by the Institute of Ecology and Environment (INEE): sites dedicated to the study of global ecology. In that framework, we try to develop new methods of data acquiring, according to an interdisciplinary way. A partnership among archaeologists and surveyors from INSA allow the 3D recording and modelling of the global volume cave. In the same time, we implement the high resolution acquiring of parietal representations (engravings and fingerings). The aim of this paper is focusing on the complementarity of data which are produced by the different scales of 3D recording used in the cave. Another purpose is to issue a statement of the different 3D technologies tested in « Les Fraux ». Finally, we propose to start a discussion about the way we try to produce a 3D documentation accurate and adapted to the researchers needs.

KEYWORDS: TERRESTRIAL LASER SCANNING (TLS), PHOTOGRAMMETRY, SURVEY, HIGH RESOLUTION, PDF-3D, ARCHAEOLOGY, CAVE, BRONZE AGE, DORDOGNE, FRANCE.

INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années, les expériences de numérisation 3D se sont développées, notamment en milieu souterrain, tant dans le domaine de l'archéologie que dans celui de l'étude des environnements. Ces travaux, à l'interface entre sciences sociales, sciences de l'environnement et sciences de l'ingénieur, constituent un enjeu essentiel, aussi bien dans le traitement, la gestion et la publication des données que dans le développement d'outils de simulation. L'objet de cet

article est de présenter les expériences conduites dans le cadre de la numérisation d'un réseau souterrain anthropisé durant l'âge du Bronze, la grotte ornée des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne). Nous proposons d'exposer ici la méthodologie de numérisation mise en œuvre sur ce site depuis 2008, dans le cadre d'une démarche interdisciplinaire, et d'explicitier les verrous méthodologiques auxquels nous avons été confrontés.

I - CONTEXTE DE L'INTERVENTION

La grotte des Fraux, découverte en 1989 sur la commune de Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne), se présente sous la forme d'un réseau complexe de galeries étroites (Figure 1), positionnées sur un même plan horizontal et se développant sur plus d'un kilomètre (Carozza *et al.* 2009). Ce paléo-écosystème souterrain, anthropisé au cours de l'âge du Bronze (fin du Bronze moyen, Bronze final : 1450-1150 BC), constitue à plus d'un titre un site d'observation et d'étude exceptionnel. Il a livré un ensemble de vestiges archéologiques d'une rare richesse : aménagements domestiques, dépôts de mobilier céramique et métallique, expres-

sions pariétales (tracés digités et incisions gravées dans l'argile meuble des parois et du plafond de la grotte). Le remarquable état de conservation des sols archéologiques comme des structures et des parois ornées est à mettre en lien avec l'effondrement du porche d'entrée de la grotte, à la fin de l'âge du Bronze (Carozza *et al.*, 2009), et constitue un atout inestimable à l'étude des interactions des sociétés de l'âge du Bronze avec leur environnement (ces interactions sont étudiées par l'analyse de l'alternance de phases où s'exercent des contraintes anthropiques fortes et des étapes de retour vers des fonctionnements naturels). L'étude de ce réseau

s'inscrit dans le cadre d'une fouille archéologique pluriannuelle programmée (dirigée par L. Carozza et financée par le Ministère de la Culture et de la Communication (SRA-DRAC Aquitaine), qui bénéficie de la création d'un nouveau type d'observatoires développées par l'Institut Écologie et Environnement du CNRS : les SEEG (le Site d'Étude en Écologie Globale « Grotte des Fraux »),

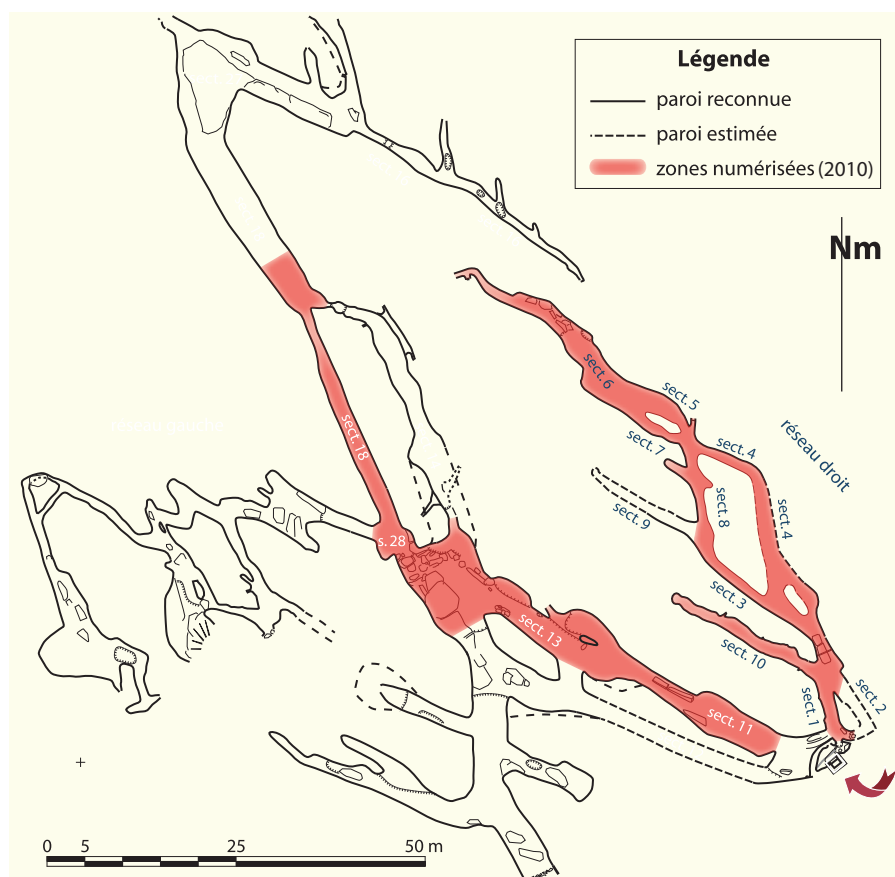


Figure 1 - Plan partiel de la grotte des Fraux.

coordonné par A. Burens, est soutenu par l'INEE sur une durée de 4 ans renouvelables). La philosophie du SEEG « Grotte des Fraux » est d'appréhender le site comme un laboratoire où sont testées de nouvelles méthodes d'acquisition de données et où s'opèrent des approches résolument interdisciplinaires. L'objectif étant l'interprétation des données archéologiques par

le développement d'études combinant le temps et l'espace (paléo-environnement, archéométrie, géochimie, lasergrammétrie, modélisation 3D...), dans une approche englobant l'ensemble des étapes de la recherche, depuis l'acquisition des données, la mise en œuvre de protocoles d'observations, l'expérimentation, jusqu'à la simulation et la restitution.

II - MÉTHODOLOGIE

Dès l'amorce du projet d'étude de la grotte des Fraux, nous nous sommes fixé pour objectif de mettre en œuvre un relevé topographique 3D de l'ensemble de la volumétrie de la cavité (Figure 1) garantissant, outre la visualisation du réseau, le géoréférencement de divers types d'informations (structurelles, archéologiques, archéométriques, relevés des parois ornées...) enregistrées dans les différentes galeries de la grotte (Grussenmeyer *et al.*, 2010 a, b). Notre projet reposant sur l'idée d'une recherche intégrée et interdisciplinaire, il était primordial que ce modèle géométrique constitue un outil de recherche commun, utilisable par l'ensemble des partenaires de l'équipe scientifique. Par ailleurs, nous avons souhaité tester des méthodes novatrices et expérimentales dans le domaine du traitement de l'image – notamment pour les œuvres pariétales – associant lasergrammétrie et photogrammétrie. Dans cet esprit, nous avons établi dès 2008 un partenariat public entre archéologues et topographes de l'INSA de Strasbourg (LSIIT, équipe TRIO), renforcé par un partenariat scientifique avec la société de fabricants de scanner FARO. En matière de topographie, l'équipe de l'INSA a réalisé un maillage de points géoréférencés sur le système Lambert II étendu, permettant l'agrégation d'informations acquises aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur du réseau. Ce travail a été réalisé avec une station totale et un GPS différentiel (en extérieur).

1 - Acquisition de la volumétrie globale du réseau par lasergrammétrie

L'acquisition des données lasergrammétiques nécessaires à l'établissement du modèle 3D général de la cavité est réalisée à l'aide d'un scanner à balayage Photon 120, particulièrement adapté au milieu souterrain (incertitude de mesure : ± 2 mm à 25 m ; vitesse d'acquisition : 122 000 à 976 000 pts/s). Le processus d'acquisition débute par le positionnement de sphères et cibles de référence sur des points spécifiques, déterminés par leur bonne visibilité depuis différentes stations. L'ensemble des sphères et points de calage est géoréférencé à l'aide d'une station totale. Un minimum de 3 sphères communes à 2 stations du scanner est nécessaire pour relier entre eux les nuages de points. Le raccordement de la topographie de la grotte à l'exté-

rieur par GPS différentiel permet la détermination des coordonnées des sphères, nécessaires à l'enregistrement des nuages de points. L'acquisition des nuages de points par le Photon s'opère par la répétition dans l'espace des stations de numérisation le long des galeries ; une zone de recouvrement entre 2 stations étant systématiquement ménagée. La durée d'une station avoisine les 7 minutes. À ce jour, ce travail de numérisation nous permet de disposer d'un jeu de données à haute densité (1pt/mm) sur 270 m de galeries (soit 2,7 milliards de points).

Le travail de traitement post-acquisition des nuages de points (rééchantillonnage, segmentation, consolidation...), leur assemblage sur la base d'un cheminement polygonal, le maillage et les opérations de lissage améliorant le rendu visuel, sont réalisés par des élèves ingénieurs à l'INSA de Strasbourg (B. Cazalet, V. Légise), sous la direction de P. Grussenmeyer. Le travail de segmentation permet de supprimer le « bruit » engendré par le matériel présent à côté du scanner, ainsi que les points inutiles. Chaque nuage de points est constitué de plus de 40 millions de points. La manipulation des données lasergrammétiques issues des multiples stations nécessite d'alléger les nuages de points et d'uniformiser le nombre de points ; cette étape de rééchantillonnage est opérée via le logiciel RealWorks développé par TRIMBLE. Cette opération nécessite un temps de calcul important (15 à 20 minutes par nuage de points). Les nuages de points peuvent alors être sauvegardés au format ASCII puis importés et fusionnés en un nuage de points global uniforme. Le géoréférencement de la totalité des nuages de points permet ici d'éviter une étape de consolidation (Grussenmeyer *et al.*, 2010 a, b).

2 - Texturer les nuages de points : un rendu « photoréaliste »

La question du traitement d'images à très haute définition est rapidement apparue primordiale à l'étude des panneaux ornés de la grotte (El-Hakim *et al.*, 2004 ; Fryer *et al.*, 2005). Cette nécessité nous a conduits à travailler à une échelle différente de celle retenue pour la volumétrie du réseau. L'équipe expérimente diverses alternatives au problème d'acquisition

et de corrélation de photographies numériques de très haute résolution des panneaux ornés au modèle 3D de la volumétrie du réseau.

Nous avons opéré un premier test d'acquisition simultanée du modèle 3D couplé aux prises de vues numériques automatiquement géoréférencées par la station totale Trimble VX équipé d'une caméra interne. Suite aux verrous méthodologiques propres à cette technique (résolution insuffisante des clichés à 3,2 mégapixels), nous avons réalisé l'acquisition automatique de photographies des parois ornées par le laser scanner Photon 120 (FARO) équipé d'un kit couleur. Ce matériel permet le couplage du scanner à un appareil photo numérique haute résolution (Nikon D200). Là encore, nous nous sommes heurtés à un problème méthodologique lié cette fois à l'impossibilité d'exploiter les clichés générés automatiquement par le scanner : le pilotage automatique interdisant tout réglage de l'appareil photo (et donc une mise au point adaptée à chaque prise de vue) une fois le scanner lancé. En 2010, nous avons poursuivi nos travaux en réalisant une série de prises de vues numériques à très haute résolution d'un grand panneau orné du secteur 13, indépendamment de la lasergrammétrie. Ce travail a été effectué à l'aide d'un boîtier Canon EOS 5D et d'objectifs 85 et 20 mm sur rotule panoramique, permettant la réalisation de vues panoramiques (Figure 2). L'appareil photo était placé dans la même configuration spatiale que le scanner. Le travail de corrélation des vues panoramiques sur le modèle 3D du secteur 13 est actuellement en cours d'élaboration.

Parallèlement, nous avons expérimenté en 2010, pour la première fois en milieu souterrain et en contexte archéologique, la dernière génération des scanners laser à bras : le Scan Arm FARO équipé de la tête laser V3 dont la précision atteint 35 μ m (19200 pts/s). L'exceptionnelle qualité d'acquisition de la tête laser est ici accentuée par la présence d'un bras articulé auto géoréférencé permettant de placer la tête laser à une

distance très réduite de la paroi (quelques centimètres), et ce quelles que soient les conditions d'accès. Les tout premiers tests effectués à l'aide de cet équipement ont permis d'acquérir des nuages de points d'une qualité exceptionnelle des expressions graphiques schématiques les plus complexes de la grotte (Figure 3). Cet équipement permet, par la visualisation en temps réel sur écran du nuage de points via une transmission Bluetooth, de pallier le phénomène des zones d'ombres (manques jusqu'alors inévitables durant les phases d'acquisition) en scannant la même zone à plusieurs reprises, selon des angles différents. Par ailleurs, le géoréférencement des nuages de points par le bras articulé facilite leur corrélation au modèle 3D de la volumétrie de la grotte. Cette dernière génération de scanner constitue indéniablement une avancée méthodologique importante.

Ce nouvel équipement, apportant une résolution infra-millimétrique, a notamment permis à l'équipe de réaliser un travail expérimental consacré à l'identification des diverses techniques employées et outils mis en œuvre pour la réalisation des panneaux ornés (Figure 4). L'objectif de cette étude, menée sur plusieurs panneaux de la cavité et leurs homologues expérimentaux (réalisés sur supports argileux à l'aide d'une large panel d'outils : silex, os, pointes en bronze et cuivre, estèques en bois sec, branches fraîchement coupées, pulpe des doigts...), est la discrimination, par la tracéologie, des différentes techniques utilisées (digitations, incisions, gravures...). La souplesse du ScanArm a permis de scanner le fond des tracés et des incisions les plus fines, y compris obliques. Le traitement de l'ensemble de ces données ainsi que du scan de la partie active des outils utilisés est actuellement en cours à l'INSA de Strasbourg. Il permettra de confronter modèles archéologiques et référentiels expérimentaux, et plus particulièrement de comparer les sections des tracés dans le but de discriminer la morphologie (voire la nature) des outils utilisés.

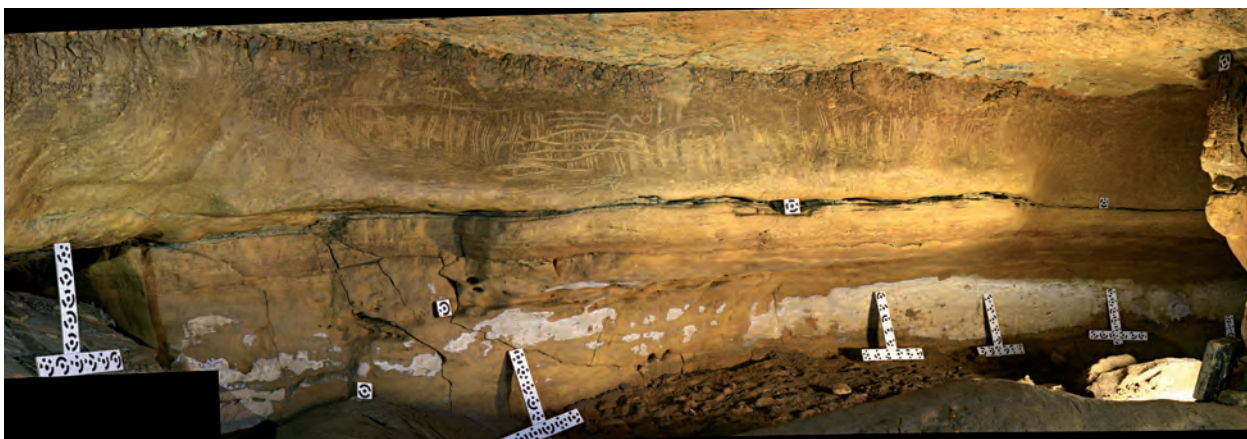


Figure 2 - Montage panoramique des clichés d'un panneau du secteur 13 de la grotte des Fraux (Canon EOS 5D/Photon 120). Noter les mires en place pour l'assemblage des scènes.



Figure 3 - Test de numérisation d'un panneau orné du secteur 13 par le scanner laser Scan Arm (FARO) ;

- a) Mise en place du ScanArm ;
- b) numérisation du grand panneau orné du secteur 13 ;
- c) modèle numérique du panneau (maillage fin) ;
- d) visualisation en temps réel des nuages de points.

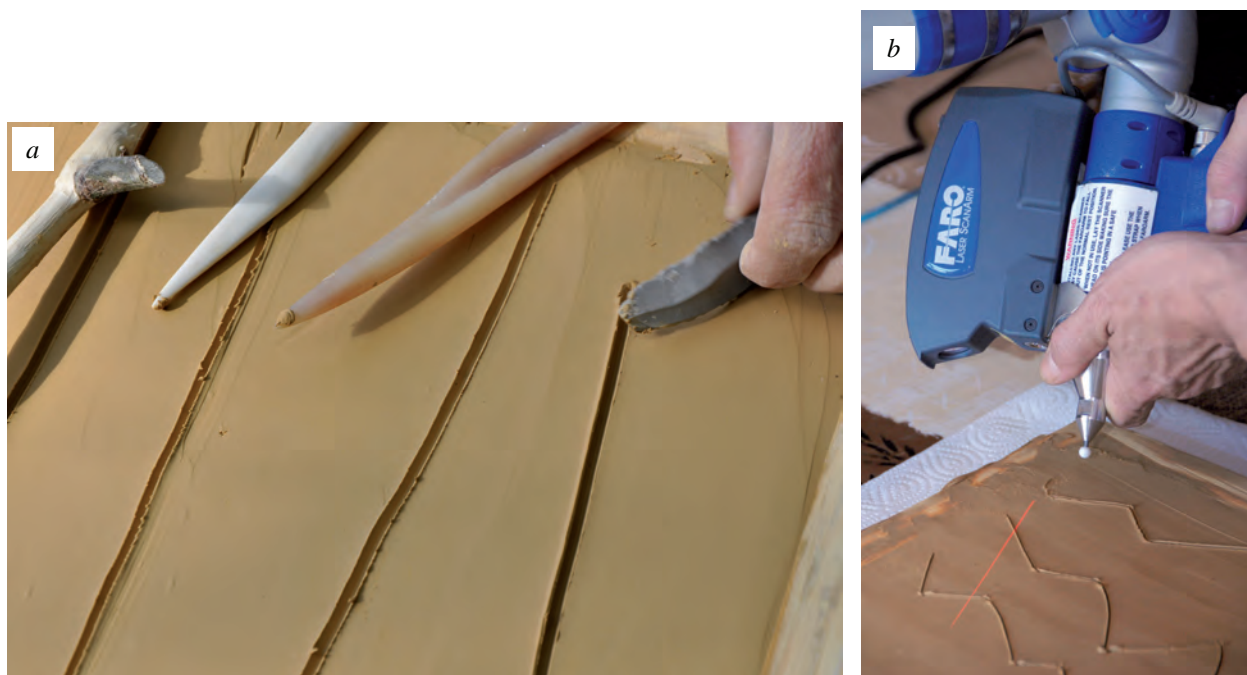


Figure 4 - Numérisation des référentiels expérimentaux par le scanner laser Scan Arm et la tête laser (FARO) ;

- a) réalisation des référentiels expérimentaux à partir de différents outils ;
- b) numérisation d'un référentiel expérimental (d'après un panneau du secteur 10).

3 - Le PDF 3D comme support d'échange et de recherche

La nécessité de faciliter les échanges et la diffusion des données au sein de l'équipe, comme l'obligation de permettre une manipulation aisée des données 3D par chaque intervenant, nous ont conduits à exporter le modèle 3D global de la grotte au format PDF-3D (Figure 5). Ce format présente l'avantage d'être lisible par le logiciel open access Adobe PDF 3D, par ailleurs simple d'utilisation. Pour cela, le géoréférencement de chaque nuage de points a été validé par le rapport général à l'aide du logiciel FARO Scene. Les écarts observés sur les sphères servant de références étaient tous inférieurs à 1 cm ; le modèle maillé a été volontairement généré avec une densité de 1 point/cm. Ce modèle général, dégradé, n'est pas réalisé pour représenter les détails, mais bien pour présenter la géométrie de la grotte. La quantité et la définition des données acquises par lasergrammétrie autorisaient une densité plus importante (1 point/mm). Cependant, le rendu visuel est tout à fait acceptable et présente l'avantage de ne pas nécessiter l'usage d'un ordinateur ultra performant pour afficher le modèle 3D. Chaque partenaire de l'équipe peut donc disposer d'un fichier permettant une visualisation et une manipulation aisée, sans matériel spécifique.

Cependant, les détails tels les tracés digités et autres expressions pariétales (d'une largeur et d'une profondeur très faibles) ne sont pas visibles sur ce modèle 3D. L'ajout de données photogrammétriques sur le maillage est en conséquence nécessaire, notamment aux pariétalistes. Pour remédier à ce problème, l'application locale d'une texture nécessite de générer un modèle maillé à plus forte densité, respectant la géométrie et permettant de bénéficier des détails apportés par les clichés numériques haute résolution. À cette échelle, le modèle permet de parfaitement visualiser l'agencement des salles et des galeries souterraines. Il est possible d'y incorporer des modèles 3D plus précis acquis avec le ScanArm (panneaux ornés).

Nous disposons pour l'heure de l'ensemble des données topographiques au format pdf et d'un plan de la grotte au 1/20^e, totalement géoréférencé, sur lequel figure l'ensemble des points de calage (polygones). Un modèle triangulé 3D, au format pdf 3D de l'ensemble de la volumétrie numérisée du réseau a été produit ; il permet de visualiser la volumétrie du réseau ou de secteurs précis. Le format pdf 3D donne accès à différents outils de mesures et de dessins associés à ces documents qui nous permettent de tracer des sections, de mesurer des surfaces et des distances. Cet outil permet aux pariétalistes l'accès à des informations non relevées dans la grotte faute d'accessibilité (précision des prises de mesures, extraction de la section des tracés...).

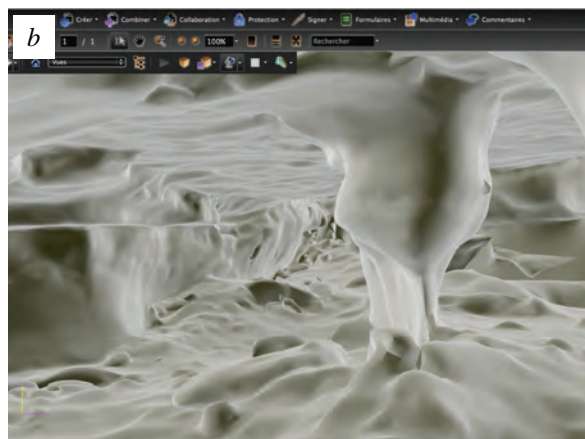


Figure 5 - Grotte des Fraux, secteur 13 ; a) vue du secteur 13 ; b) modèle 3D exporté au format pdf 3D.

III - CONCLUIONS ET PERSPECTIVES

Depuis le début de l'opération en 2008, les principaux verrous méthodologiques auxquels nous avons été confrontés concernent essentiellement (i) l'intégration de données hétérogènes, acquises à différentes échelles et différentes résolutions, dans un modèle numérique global en 3D et (ii) le texturage des nuages de points et des modèles 3D par le mappage d'images

acquises à très haute résolution. Au-delà de la finalisation de la numérisation 3D de la volumétrie de la grotte (l'année 2011 sera mise à profit pour tester le FARO Focus) et de la généralisation de l'enregistrement 3D en haute définition des panneaux ornés de la grotte par le ScanArm, nos perspectives à court et moyen terme sont :

- la finalisation, courant 2011, de l'approche tracéologique expérimentale conduite sur les expressions pariétales ;
- la poursuite des recherches sur le texturage des modèles 3D haute résolution à partir de caméras calibrées ;
- la recherche d'une solution optimale au mappage des photographies numériques haute définition sur le modèle 3D ;
- la réponse à la demande des pariétalistes de bénéficiaire de mosaïques photographiques géoréférencées des panneaux ornés, dans le but d'en extraire des orthophotographies sur lesquelles ils pourront réaliser leurs relevés (ces derniers pouvant à leur

- tour être corrélés sur le modèle global 3D de la grotte, constituant ainsi une couche d'information supplémentaire) ;
- la mise au point de solutions d'automatisation du traitement de l'orientation des images et de la colorisation des nuages de points à partir des images orientées ;
- l'intégration de l'ensemble des données planimétriques dans un système d'information géographique (production de cartes en 2D) ;
- l'intégration de la volumétrie globale de la grotte dans un modèle numérique de terrain permettant de mieux appréhender le processus de formation et d'évolution du réseau karstique.

Remerciements

Les recherches menées sur le site des Fraux bénéficient du soutien du Service Régional de l'Archéologie (DRAC Aquitaine) ainsi que de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS. Nous tenons à remercier chaleureusement E. et M. Goineaud, propriétaires de la grotte des Fraux, pour l'autorisation de publier les images produites dans la grotte.

BIBLIOGRAPHIE

- CAROZZA L., BURENS A., BILLAUD Y., FERRULO O., BOURRILLON R., PETROGNANI S., FRITZ C., TOSELLO G., GOINEAUD E. et M., 2009. L'horizontal et le vertical - L'âge du Bronze de la grotte des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas - Dordogne). In : *De Méditerranée et d'ailleurs...* Mélanges offerts à Jean Guislain. Archives d'Ecologie Préhistorique Toulouse, 2009, 159-172.
- EL-HAKIM S.F., FRYER J.G., PICARD M., 2004. Modelling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame cave. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35, 5, 990-995.
- FRYER J.G., CHANDLER J.H., EL-HAKIM S.F., 2005. Recording and modelling an aboriginal cave painting : with or without laser scanning. In : 1st 3D-ARCH International Symposium, Mestre-Venice, Italy. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, XXXVI-5/W17, 8 p.
- GRUSSENMEYER P., CAZALET B., BURENS A., CAROZZA L., 2010 a. Close range terrestrial laser scanning and photogrammetry for the 3D documentatin of the Bronze age cave « les Fraux » Périgord, France. Mining in *European History, Special Conference of the SFB HiMAT*, Innsbruck 2010, Innsbruck university press, 411-421.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., ALBY E., CAROZZA L., 2010 b. High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave "les Fraux" in Périgord (France). ISPRS Comm. V Symposium, Newcastle upon Tyne, June 22-24, UK. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, 5, 262-267. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/221.pdf>

SITOGRAFIE

Blog de la grotte des Fraux : <http://champslibres.hypotheses.org/>

MODÉLISATION DU DIAPIR DE BAKIO

PAYS BASQUE ESPAGNOL

EXEMPLE D'UTILISATION DE DONNÉES LIDAR POUR LA MODÉLISATION EN 3D DE SURFACES GÉOLOGIQUES

*BAKIO DIAPIR MODELLING (BASQUE COUNTRY, SPAIN):
EXAMPLE OF 3D GEOLOGICAL SURFACES MODELING BASED ON LiDAR DATA*

YOHANN POPRAWSKI

GEOLINK, Les Jardins de Maupertuis, 13 Chemin de la Dhuy, 38240 Meylan, France.

Contact : y.poprawski@geolink-s2.com

RÉSUMÉ

Un premier modèle du diapir de Bakio basé sur des données géologiques classiques (carte, coupes structurales) a été affiné à partir de données LiDAR qui permettent d'identifier et de modéliser plus précisément différents surfaces stratigraphiques en 3D.

MOTS-CLÉS : DIAPIR, MODÉLISATION, LiDAR.

ABSTRACT

The geological model of the Bakio diapir based on classical geological data (map, structural cross-sections) have been improved with LiDAR data, which allows us to identify and build more accurate stratigraphic surfaces in 3D.

KEYWORDS: DIAPIR, MODELLING, LiDAR.

INTRODUCTION

En géologie, nombreuses applications nécessitent une vision 3D des structures géologiques comme lors de la caractérisation structurale d'un réservoir pétrolier. Une étape de modélisation 3D des surfaces géologiques est donc souvent nécessaire. Les modèles géologiques utilisés pour caractériser les réservoirs sont généralement obtenus à partir de différents types de données (sismique, forages, log stratigraphiques, cartographie, coupes géologiques). Pour la création de modèles géologiques à terre, le LiDAR possède l'avantage d'offrir une résolution très élevée, à l'échelle de

l'affleurement. La topographie des affleurements, qui peut être imagée grâce au LiDAR, résulte de l'interaction entre les surfaces géologiques et les processus de surfaces (érosion, processus gravitaires, etc.). Les données LiDAR contiennent donc des informations géologiques qui peuvent être utilisées à condition de les identifier, à partir d'étude de terrain. Des données géologiques, extraite du LiDAR peuvent donc être intégrées dans un modèle de manière à suivre des surfaces géologiques en 3D avec une haute précision.

LE DIAPIR DE BAKIO

Dans notre cas, le modèle géologique du diapir de Bakio (Pays Basque espagnol, Nord-Est de Bilbao) a été réalisé de manière à caractériser les géométries des dépôts associés. Le diapir de Bakio est un diapir d'argile rouges et de gypse triasique qui a fonctionné pendant l'Albien. Ce premier modèle a été réalisé à

partir de notre carte géologique et de nos coupes géologiques suite à une étude structurale et stratigraphique de la zone d'étude. Le modèle obtenu, correspond à un bloc d'environ 5 km sur 4 km, intégrant la géométrie 3D des surfaces. L'acquisition LiDAR de la zone d'études, en particulier des affleurements côtiers, a

permis d'obtenir des données plus précises à l'échelle de l'affleurement. Ces données pourront être intégrées au premier modèle de manière à obtenir une meilleure résolution et à caractériser de manière plus précise les surfaces géologiques.

L'un des affleurements étudié au LiDAR est utilisé pour illustrer la méthode de création de surfaces géologiques à partir de données LiDAR (Figure 1A). Cet affleurement correspond à un éventail sédimentaire dans le flanc ouest du diapir. Les données structurales ont montré que la mise en place de l'éventail résulte du basculement progressif des flancs du diapir pendant la montée du sel triasique lors de la sédimentation albienne. Le basculement progressif des flancs du diapir pendant la sédimentation explique la mise en place de couches présentant des pendages décroissant vers le haut, associé à une série de discordances entre les ensembles de pendages différents. Cet affleurement est donc un exemple privilégié pour comprendre les relations qui existent entre un diapir et les dépôts associés. Lors des premières campagnes de terrain, les différentes surfaces (surfaces stratigraphiques et failles) ont été identifiées. Les données LiDAR ont permis d'obtenir un modèle numérique de terrain de l'affleurement avec une résolution inférieure au mètre. La précision du MNT (Modèle Numérique de Terrain) permet de retrouver une grande partie des surfaces identifiées lors des campagnes de terrain. En effet, sur le MNT, nombreuses surfaces stratigraphiques montrant des pendages différents sont

visible ainsi que certaines failles (Figure 1A).

D'un point de vue méthode, la première étape correspond à l'import du nuage de point obtenu par acquisition LiDAR dans *Gocad*, puis à la création de la surface topographique. La seconde étape constitue à identifier sur le MNT les différentes surfaces géologiques identifiées sur le terrain puis à les redessiner sous forme de nuages de points ou de courbes dans *Gocad* (Figure 1B). Les nuages de points et les courbes définissent la géométrie 3D des surfaces dessinées. Ici, ces nuages de points et courbes sont trop limités pour construire des surfaces géologiques d'une extension spatiale suffisante. Nous avons donc extrapolé la géométrie des surfaces grâce à nos connaissances sur l'orientation des surfaces stratigraphiques à partir de nos données de terrain. Nous avons donc rajoutés quelques points supplémentaires aux premiers nuages de points de manière à les étendre spatialement. Le programme *Gocad* permet l'obtention de surfaces géologiques à partir de triangulation successives et en fixant la géométrie des surfaces grâce aux nuages de points (Figures 1C et 1D). La géométrie des surfaces obtenues s'adapte au nuage de point de manière à obtenir la géométrie attendue. Les surfaces obtenues pourront donc ensuite être intégrées au modèle du diapir, de manière à le complexifier pour obtenir un modèle plus exhaustif, présentant les structures à l'échelle régionale mais aussi à l'échelle métrique grâce aux données LiDAR.

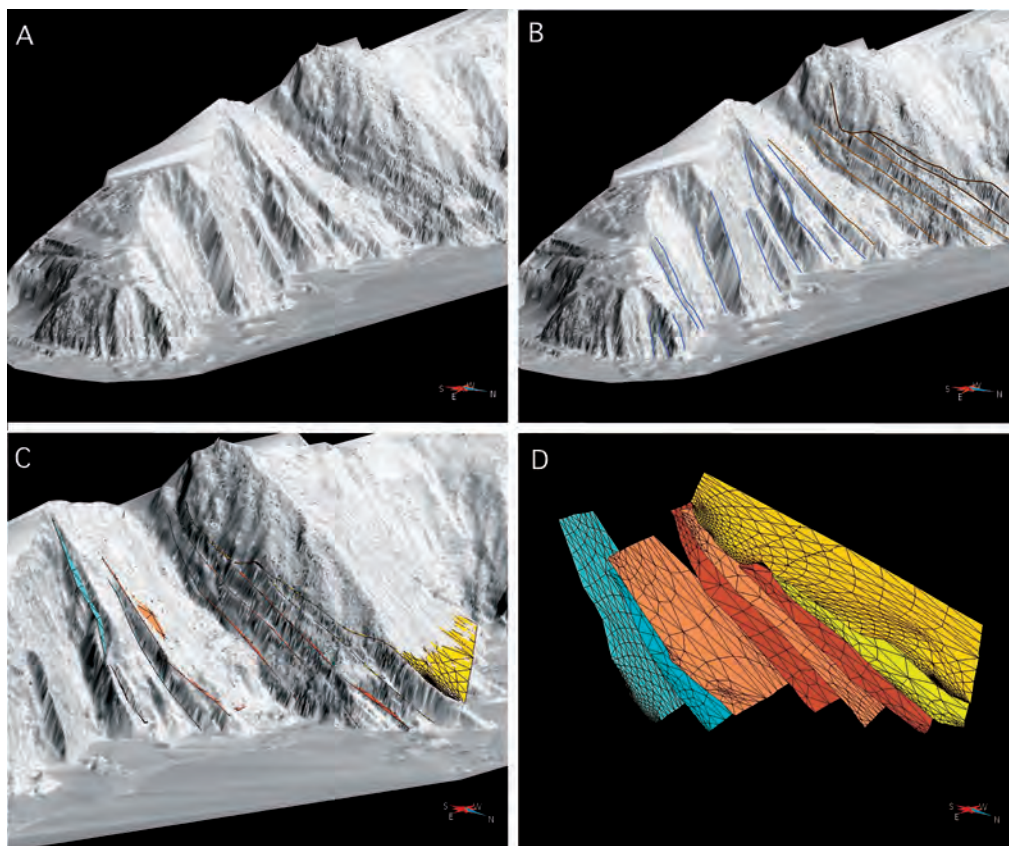


Figure 1 - étapes de la construction des surfaces à partir de données LiDAR dans *gOcad*.

- 1A : MNT ;
- 1B : reconnaissance des surfaces stratigraphiques et linedrawing sur le MNT ;
- 1C : création des surfaces stratigraphiques contraintes par le MNT ;
- 1D : surfaces stratigraphiques obtenues.

PLAN URBAIN ET SIG ARCHÉOLOGIQUE

L'EXEMPLE DE QALHAT OMAN

PLAN AND URBAN ARCHAEOLOGICAL GIS

EXAMPLE OF QALHAT (OMAN)

EMMANUELLE RÉGAGNON, OLIVIER BARGE

*Laboratoire Archéorient, UMR 5133-CNRS / Université Lumière Lyon 2
Maison de l'Orient et de la Méditerranée - Jean Pouilloux, 7 rue Raulin, 69365 Lyon cedex 7, France.*

Contact : emmanuelle.regagnon@mom.fr

RÉSUMÉ

La méthode de relevé suivie sur le site archéologique de Qalhat (Oman) combine les ressources du DGPS et des photos aériennes, en concevant d'emblée le plan comme un système d'information géographique. Outre la rapidité d'acquisition que permet la méthode, la structuration des données offre des intérêts multiples, tant sur la transparence de l'interprétation que sur les possibilités d'analyse spatiale. Enfin, les outils SIG débouchent sur une grande souplesse de rédaction cartographique ainsi que des représentations en perspective, qui permettent d'appréhender la réalité archéologique de la cité tant dans une démarche scientifique que de diffusion auprès de grand public.

MOTS CLEFS : SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE, ARCHÉOLOGIE, RELEVÉ, VUES PERSPECTIVE.

ABSTRACT

The survey method used on the archaeological site of Qalhat (Oman) combines the resources of both DGPS and aerial photographs. From the beginning the map is built as a geographic information system (GIS). This survey method is very quick and offers many other advantages concerning mostly the transparency of interpretation and the means of spatial analysis. Moreover GIS tools lead to more flexibility in map drawing and allow perspective views which show the historical reality of the city both for research purposes and scientific popularization.

KEYWORDS: GIS, ARCHAEOLOGY, SURVEY, PERSPECTIVE VIEWS.

INTRODUCTION

Qalhat est une cité portuaire fondée au 11^e siècle qui a eu son heure de gloire entre le 13^e et le 15^e siècle, sous le royaume d'Hormuz. Sa position stratégique à l'entrée du golfe persique et son commerce florissant avec l'Inde et la Chine en ont fait un pôle économique majeur de l'islam médiéval. Mais lors d'un tremblement de terre à la fin du 15^e siècle, la ville s'effondra littéralement sur elle-même, achevant un déclin déjà entamé avec le développement du port de Mascat, l'actuelle capitale du sultanat d'Oman. Achevée d'être détruite lors de l'invasion portugaise quelques décennies plus tard, la ville fut définitivement abandonnée au 16^e siècle.

Malgré l'intérêt patrimonial du site, celui-ci n'avait jamais été étudié jusqu'alors. Mais devant l'affluence croissante des touristes, les autorités omanaises ont demandé à une archéologue française du CNRS,

A. Rougeulle, UMR 8167, de mener une étude sur l'ensemble de la ville dans le cadre d'un projet de 4 ans.

Si la fouille stratigraphique permet de confirmer la chronologie déjà brossée, elle ne permet pas dans le délai attribué de dresser un plan de la ville qui s'étend sur 35 hectares, rien que pour la zone intra-muros. D'autre part, la densité et la complexité des vestiges effondrés empêche une vision analytique de l'ensemble au niveau du sol. Une couverture aérienne partielle au cerf-volant avait été réalisée quelques années auparavant, mais l'utilisation de ces seuls documents compromettrait la précision du relevé, à cause des problèmes de lecture des images (interprétation des éboulis) ou de géoréférencement. Enfin, la configuration en pente du terrain n'autorisait pas l'exécution d'un relevé au tachéomètre dans les délais impartis (Figure 1).



Figure 1 - Le site de Qalhat par photo aérienne au cerf-volant, en 2009 .

I - COMBINAISON DE MÉTHODES : DGPS ET PHOTO AÉRIENNE

Le relevé des structures fut donc entamé au GPS différentiel, selon des classes d'entités (point, ligne polygonale) qui correspondent aux éléments observés sur le terrain. Pour chacun d'eux est associé un dictionnaire d'attributs où l'on définit les champs descriptifs. Ainsi donne-t-on par exemple pour l'entité murs (qui seront des lignes) des champs consignants largeur, élévation, type de parement, ou commentaire.

Sur le terrain, le relevé se dessine au fur et à mesure sur l'écran du GPS, intégrant en même temps la description de chaque élément. Cette méthode permet une grande rapidité d'exécution, tout en garantissant une précision spatiale élevée. Elle s'est révélée tout à fait adaptée pour les parties simples du site, à l'architecture basse et clairsemée. Toutefois dans des secteurs comme celui de la vieille ville, où les bâtiments resser-

rés comptaient plusieurs étages, les ruines présentent de tels amoncellements qu'il était presque impossible de percevoir au sol l'organisation du quartier. Dans ce secteur, le réseau de rues a d'abord été relevé au DGPS, puis les photos aériennes ont été géoréférencées afin de vectoriser les bâtiments. De retour sur le terrain, la localisation et la forme du bâti ont été vérifiées, éventuellement corrigées et complétées. D'autre

part, pour chaque « pièce » d'un bâtiment était enregistré un point, qui permettait d'obtenir une valeur d'altitude, mais également de détailler sa fonction (pièce, cour, terrasse...) et son niveau (rez de chaussée, niveau 1, 2...) qui sans présager de la hauteur réelle du bâtiment, rend compte des niveaux des pièces les uns par rapport aux autres.

II - STRUCTURATION DES DONNÉES DANS UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

L'ensemble du relevé sur le terrain se structure ainsi selon une base de données spatiales, où se combinent les observations vues au sol et du ciel. Les tables attributaires consignent la description de chaque entité, selon des critères systématiques (mesures, matériaux) ou ponctuels (commentaire, particularité, etc.). Afin de conserver intactes les observations de terrain, celles-ci ont été stockées brutes dans une base de données servant de support à la construction d'une seconde base, dénommée modèle. Dans cette dernière, les données originelles ont servi à générer de nouvelles entités partageant une topologie définie. Ainsi par exemple, chaque espace délimité était strictement fermé, ou encore les places étaient délimitées par les bâtiments la bordant (Figure 2).

On peut considérer cette nouvelle base de données comme une interprétation de la donnée brute observée sur le terrain, mais selon des critères déterminés et transparents, éventuellement modifiables. Avec la progression de la connaissance du site, il devient facile de générer un nouveau modèle, soit en changeant les critères topologiques, soit en intégrant de nouveaux relevés, de fouille par exemple (Figure 3).

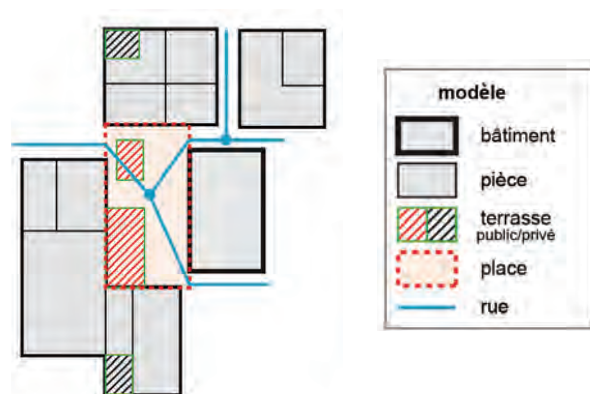


Figure 2 - Le jeu de classes d'entités « modèle » et les relations topologiques.

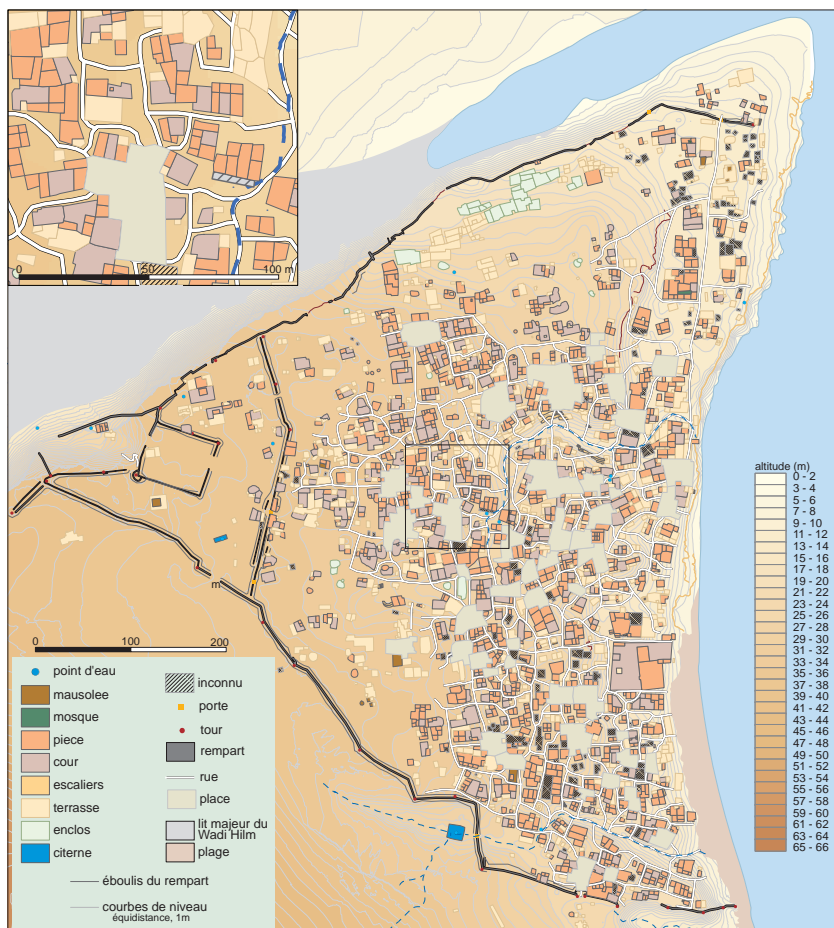


Figure 3 - Plan du site de Qalhat d'après le relevé obtenu, et traité selon les outils topologiques.

D'autre part, l'utilisation des outils topologiques permet une structuration systématique du relevé, et ouvre des possibilités d'analyse spatiale à l'échelle de la ville. On peut ainsi par exemple, initier des analyses de réseau ou de contiguïté.

L'autre avantage du système d'information géographique à l'échelle du plan est la facilité de rédaction

cartographique, rendue possible par les champs attributaires qui caractérisent chaque entité. On peut en effet produire facilement différents plans de la ville, selon des thématiques variées. Bien plus, les outils SIG proposent d'autres formes de représentation, comme la vision en perspective du site.

III - REPRÉSENTATIONS VUE CAVALIÈRE

Pour cela, chaque espace fermé a été transformé en surface, à laquelle ont été transposés les attributs enregistrés dans les points « pièces ». Chaque polygone recevait donc une valeur d'altitude, et également une valeur de niveau observée sur le terrain (0 pour le rez de chaussé, 1, 2). Pour éviter que deux polygones adjacents de même niveau se fondent à l'extrusion, il était nécessaire que leur valeur de hauteur soit différente. Des sous-niveaux leur ont été affectés de façon arbitraire afin d'obtenir de légers décalages qui permettent de les différencier visuellement.

Cette information de niveau / sous niveau a été convertie en hauteur en mètres pour préparer l'extrusion des polygones. Bien entendu, ces hauteurs ne doivent pas être comprises comme une réalité exacte, mais permettent néanmoins, à l'échelle de la ville, de représenter les masses du bâti de manière vraisemblable.

Les bâtiments ont été extrudés sur une surface topographique obtenue par un MNT sur l'ensemble du site lors de la première campagne. Pour restituer l'environnement lointain et la ligne d'horizon des vues distantes, un second MNT a été utilisé, fondé sur le MNT SRTM et enrichi des courbes de niveau d'une carte topographique (Figure 4).

Les vues en perspective, voire les films que l'on obtient offrent tout d'abord un intérêt pédagogique évi-

dent. Qalhat est aujourd'hui un champ de ruines, et lors de sa visite, le touriste peut difficilement s'imaginer la réalité de la cité médiévale. Les restitutions proposées ici, même grossières, l'aident à visualiser directement l'aspect général de la ville.

D'autres exemples de restitution pour la vulgarisation archéologique, souvent plus réalistes, ont été menés ces dernières années, démontrant le même intérêt attractif et didactique. Cependant, ces restitutions menées scientifiquement à l'aide des outils géomatiques ne sont pas seulement utiles au grand public. En effet, il existe toujours des inconnues qui amènent l'archéologue à faire des hypothèses et des choix scientifiques sur ce qu'il représente dans ses restitutions. Les produire l'amène donc à se poser des questions, et à éventuellement envisager d'autres orientations de recherche (Figure 5).

Les restitutions en perspective permettent également à la communauté scientifique qui n'aurait pas visité le site de s'en faire une idée plus intelligible. Elles constituent un support à la discussion et à la critique. Les erreurs ou les incohérences ainsi mises en lumière peuvent rapidement être corrigées en intervenant sur la base de données « modèle ». Dans la même logique, des hypothèses peuvent être testées par des simulations.



Figure 4 - Vue cavalière de la ville portuaire, depuis l'océan. Elle permet de montrer l'aspect général de la cité et aussi son environnement topographique très protégé.

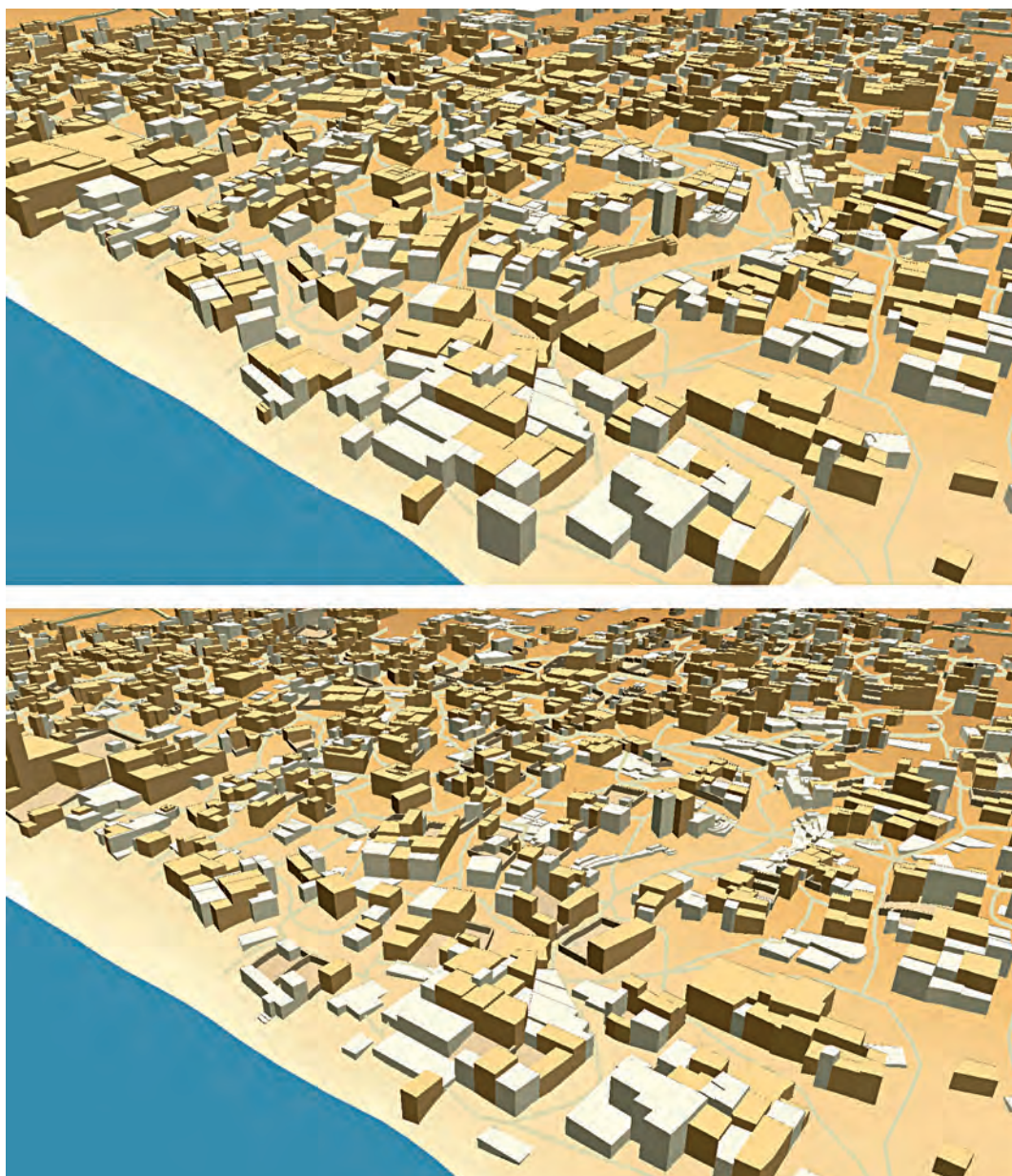


Figure 5 - Evolution du modèle après une rencontre avec l'archéologue (de haut en bas) : l'accent est mis sur la représentation des cours intérieures des maisons, des terrasses (en blanc) circulatoires ou de repos, différenciées selon leur élévation. Certains plans de fouilles seront ajoutés dans la base de données « relevé », et permettront de corriger leur restitution dans le modèle. Chaque modèle est conservé, permettant de sauvegarder l'évolution du travail.

CONCLUSION

Dans une optique plus générale de méthodes d'acquisition des données de terrain pour produire un plan, la mise en place d'un système d'information géographique montre l'intérêt de revisiter les techniques de relevés de terrain en archéologie. Les nouveaux outils d'acquisition permettent tout d'abord un gain de temps et d'efficacité, qui étaient la condition pour un résultat à cette échelle dans le délai imparti. Concevoir le relevé d'emblée comme un système d'information géographique fait adopter une démarche acquisition/structuration des données/représentation plutôt qu'une

démarche acquisition/représentation (dessin). L'étape intermédiaire revient à formaliser des règles d'interprétation, qui restent habituellement implicites dans un dessin. Mais elle est surtout porteuse de nouveaux usages rendus possibles par le SIG :

- il devient tout d'abord possible à l'archéologue, même s'il n'est pas spécialiste en géomatique, de mener une démarche exploratoire des données en jouant sur les fonctions de navigation, d'affichage, de mesure ou d'interrogation. Les données nouvelles s'intègrent d'autre part facilement dans la

sauvegarde des données brutes, permettant actualisation optimum des découvertes obtenues sur le site. De là, le modèle peut être aisément modifié et amélioré, et s'offrir à la critique scientifique ;

– d'autre part, les données formalisées permettent de mener des analyses spatiales (réseau, distances, densité...) ;

– enfin plusieurs modes de représentation deviennent possibles, thématiques grâce aux outils de cartographie automatique, ou en perspective pour un usage tant scientifique que de communication.

L'ensemble de ces nouveaux usages font ainsi partie intégrante du plan ou de la carte, qui devient un outil vivant et pertinent.

BIBLIOGRAPHIE

BARGE O., SANZ S., MOURAILLE J., 2005. Finalités et contraintes des inventaires archéologiques : réflexions et pistes pour la mise en œuvre. Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie, XXV^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Antibes, Editions APDCA, 249-258.

FORTIN M., POULIOT J., LOSIER L.-M., 2007. 3D geometrical modeling of excavation units at the archaeological site of Tell 'Acharneh (Syria). *Journal of archaeological science*, 34, 2, 272-288.

JÉGOU L., 2007. La troisième dimension en cartographie statistique, des cartes en prisme imprimées aux modèles 3D interactifs. *Mappemonde*, 86 (2-2007), 2007. <http://mappemonde.mgm.fr/num14/articles/art07202.html>

SANZ S., BARGE O., 2005. Vol au dessus d'un tas de cailloux : la photographie aérienne par cerf-volant pour la recherche archéologique. Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie, XXV^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Antibes, Editions APDCA, 273-278.

UBELMANN Y., à paraître. Hypothèse de restitution de l'ensemble de la ville, in Castel C., Barge O., Awad N., Al-Maqdissi M., (dir), Des villes neuves aux marges du désert de Syrie à la fin du 3^e millénaire, TMO.

COMPARAISON LASERGRAMMÉTRIE / PHOTOGRAMMETRIE POUR LA MESURE DE L'ÉROSION DE PIERRES DE FAÇADE ABBATIALE DE MANGLIEU - PUY-DE-DÔME

*SHORT RANGE LiDAR AND NUMERICAL PHOTOGRAMMETRY COMPARISON
OF STONE DECAY ON THE MANGLIEU ABBEY CHURCH, PUY-DE-DÔME, FRANCE*

FRANCK VAUTIER, OLIVIER VOLDOIRE

*GEOLAB UMR 6042 - CNRS, Maison des Sciences de l'Homme/Université Blaise Pascal, 4 rue Ledru,
63057 Clermont-Ferrand cedex 1, France.*

Contact : franck.vautier@univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ

Dans le cadre de deux programmes de recherche portant sur la dégradation des monuments historiques, des méthodes de lasergrammétrie courte portée et de photogrammétrie numérique sont appliquées à la quantification et à la spatialisation de l'érosion de la pierre. Le matériel utilisé, la mise en oeuvre sur le terrain et les niveaux de précision atteints par les différentes méthodes sont analysés et comparés. Leurs champs d'application respectifs sont ensuite évalués et discutés.

MOTS-CLÉS : QUANTIFICATION DE L'ÉROSION, MONUMENTS HISTORIQUES, LASERGRAMMÉTRIE COURTE PORTÉE, PHOTOGRAMMÉTRIE STÉRÉOSCOPIQUE ET MULTI-IMAGES, COMPARAISON MÉTHODOLOGIQUE.

ABSTRACT

In close cooperation with two research programs on historical monuments deterioration, short range LIDAR and numerical photogrammetry methods are applied to the quantitative analysis and mapping of stone decay. Used equipment, implementation on the field and precision levels are analysed and compared. Their respective fields of application are finally discussed and estimated.

KEYWORDS: WEATHERING QUANTIFICATION, MONUMENT STONES, SHORT RANGE LiDAR, PHOTOGRAMMETRY, METHODOLOGY EVALUATION

INTRODUCTION

Cet article présente la synthèse d'un travail méthodologique de quantification et de spatialisation de l'érosion de la pierre monumentale mise en oeuvre dans le cadre de deux programmes de recherche dirigés par Marie-Françoise André : le programme «TECHNE - Impact des techniques de mise en oeuvre de la pierre monumentale sur la durabilité du patrimoine bâti médiéval (2009-2012)» et le projet «Eglises romanes d'Auvergne – durabilité du patrimoine médiéval (2008-2011)». A vocation interdisciplinaire, ces programmes réunissent des géographes, des historiens du bâti, des géologues et des géomaticiens et ont pour objectif de mettre en évidence la possible responsabilité de pratiques de restauration et de conservation sur l'accélération de la dégradation du patrimoine constatée depuis les années 1960 (André et Phalip, 2010). Du fait de la difficulté de mesurer l'érosion sur des portions de bâti complexes, chronologiquement hétérogènes et caractérisées par des profondeurs d'altération variant de plusieurs centimètres à quelques millimètres, les méthodes de mesure de la dégradation de la pierre utilisées jusqu'à présent tels que le pied à coulisse, le micromètre, le réglet (Fitzner, 1990 ; Mottershead, 1994 ; Bonneau, 2001 ; Inkpen *et al.*, 2001 ; Robert, 2002 ; Augeyre, 2006 ; André *et al.*, 2008) s'avèrent inadaptes, souffrant de limites d'application sur le terrain et de lacunes dans la précision de la donnée et l'élaboration de documents infographiques exploitables. L'idée est donc de relayer ces techniques traditionnelles en faisant appel aux nouvelles technologies de spatialisation 3D telles que la lasergrammétrie et la photogrammétrie numérique. Capables de produire des modèles 3D avec

une densité de points élevée et une précision métrologique très fine, ces méthodes sont aptes à répondre aux exigences de précision et de spatialisation de l'érosion fixées dans les objectifs du projet. Trois méthodes ont été testées en parallèle sur un même site d'investigation (Tableau 1) : la lasergrammétrie courte portée, la photogrammétrie stéréoscopique déjà mise en oeuvre lors d'une première expérience (Vautier *et al.*, 2008) et la photogrammétrie multi-images. L'objectif de ces tests est d'évaluer les avantages et les inconvénients de ces 3 méthodes sur la base de plusieurs critères d'analyse : l'investissement nécessaire à l'acquisition du matériel, la facilité de mise en oeuvre sur le terrain et le degré de précision des résultats obtenus. Le critère de précision est prépondérant car il garantit le niveau de détail nécessaire pour une bonne estimation de l'érosion.

Le test a été réalisé sur l'église abbatiale de Manglieu (Puy-de-Dôme, France) dont les pierres de la façade ouest sont sévèrement détériorées. Daté du 12^e siècle, cet édifice présente des phénomènes d'altération intenses affectant des pierres en gneiss. Encadrées par des granites sains ou très peu altérés mis en place au 19^e siècle, ces pierres gneissiques sont soit coalescentes, formant ainsi des surfaces alvéolisées parfois supérieures au mètre carré, soit isolées avec des profondeurs d'altération de plusieurs centimètres. Les trois méthodes ont été testées sur un échantillon de trois pierres isolées présentant chacune des caractéristiques morphologiques complexes en relation avec des profondeurs d'altération hétérogènes et un taux d'alvéolisation plus ou moins marqué (Figure 1).

I - MATÉRIEL UTILISÉ, MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

1 - La lasergrammétrie courte portée (L)

L'appareil utilisé est le Konica Minolta VI 910. C'est un scanner laser courte portée (0,5 - 2 m) qui fonctionne par triangulation et permet de relever de façon quasi instantanée (2 secondes pour 300 000 points) une surface de 50 cm². La précision est infra-millimétrique (X : $\pm 0,22$ mm ; Y : $\pm 0,16$ mm ; Z : $\pm 0,1$ mm). Sur le terrain, cet appareil est positionné sur un trépied et alimenté par un groupe électrogène. L'opération de mesure est contrôlée par le logiciel Polygon Editing Tool. L'une des contraintes majeures est qu'il n'est opérationnel que pour des intensités lumineuses faibles (< 500 lux), ce qui nécessite de recouvrir la surface d'étude à l'aide d'une bâche occultante.

2 - La photogrammétrie stéréoscopique (PS)

Le principe de base de la méthode consiste à réaliser deux prises de vue parallèles ou très peu convergentes d'un objet. La distance entre les prises de vue doit être généralement de 1/5 de l'éloignement de l'objet photographié (Guillotin, 1997). Un appareil photographique de modèle Canon Eos 400D (résolution : 3 888/2 592 pixels) est utilisé avec une focale fixe de 60 mm. Les paramètres de calibration sont calculés à l'aide d'un banc de calibration et du logiciel Image MasterCalib. Une station totale à visée laser est utilisée pour déterminer les coordonnées de cibles (gommettes) qui servent à positionner les clichés dans un référentiel métrique et orienter les modèles dans un système 3D. La modélisation est ensuite réalisée avec le logiciel Image MasterPro.

3 - La photogrammétrie multi-images (PM)

L'application de la photogrammétrie multi-images est une solution séduisante car elle est peu coûteuse (300 €) et très légère à mettre en oeuvre puisque un appareil numérique autofocus seul, ne nécessitant pas de calibration spécifique, est utilisé. La première opération consiste à positionner des cibles (gommettes) à la périphérie de chaque pierre et à mesurer les distances entre ces cibles à l'aide d'un mètre de chantier.

Ces mesures servent ensuite à déterminer l'échelle du modèle produit. La seconde opération consiste en une couverture photographique complète de l'objet sous plusieurs angles. En moyenne, 30 clichés ont été réalisés par pierre. La modélisation est effectuée avec l'application libre Bundler.

Les trois modèles produits (Figure 1) sont ensuite exportés dans le logiciel 3D Geomagic afin de subir plusieurs phases de traitement et de mesures.

Méthodes	Matériel de terrain	Coût/poids	Logiciels de post-traitement	Avantages (+) Inconvénients (-)
Lasergrammétrie	<ul style="list-style-type: none"> - Scanner laser Konica Minolta + logiciel PET - trépied Manfrotto - portable de terrain - groupe électrogène - bâches occultantes - escabeau - luxmètre 	45 000 €/16 kg 1 500 €/10 kg 4 000 €/3 kg 1 500 €/10 kg 5 kg 5 kg -		(+ +) Mesure directe (pas de post-traitement) (- -) Coût, poids (- -) Requiert une faible intensité lumineuse (<500 lux) (-) Pas de batterie interne (groupe électrogène) (-) Nécessite un haut niveau technique
Photogrammétrie stéréoscopique	<ul style="list-style-type: none"> - appareil numérique - logiciel de calibration (ImageMaster Calib) - trépied - station totale - cibles (gommettes) 	- 500 €/800 g - 300 €/2 kg - 10 000 €/10 kg	Image MasterPro (5000 €)	(-) Mesure indirecte (-) Coût, poids (-) Nécessite une pré-calibration (-) Nécessite un haut niveau technique
Photogrammétrie multi-images	<ul style="list-style-type: none"> - appareil photo Autofocus - cibles (gommettes) - mètre de chantier 	- 300 €/500 g	Bundler (application libre)	(-) Mesure indirecte (+ +) Coût, poids (+) Technique facilement accessible

Tableau 1 - Matériels et logiciels utilisés pour les 3 méthodes d'acquisition 3D et synthèse de leurs avantages et inconvénients

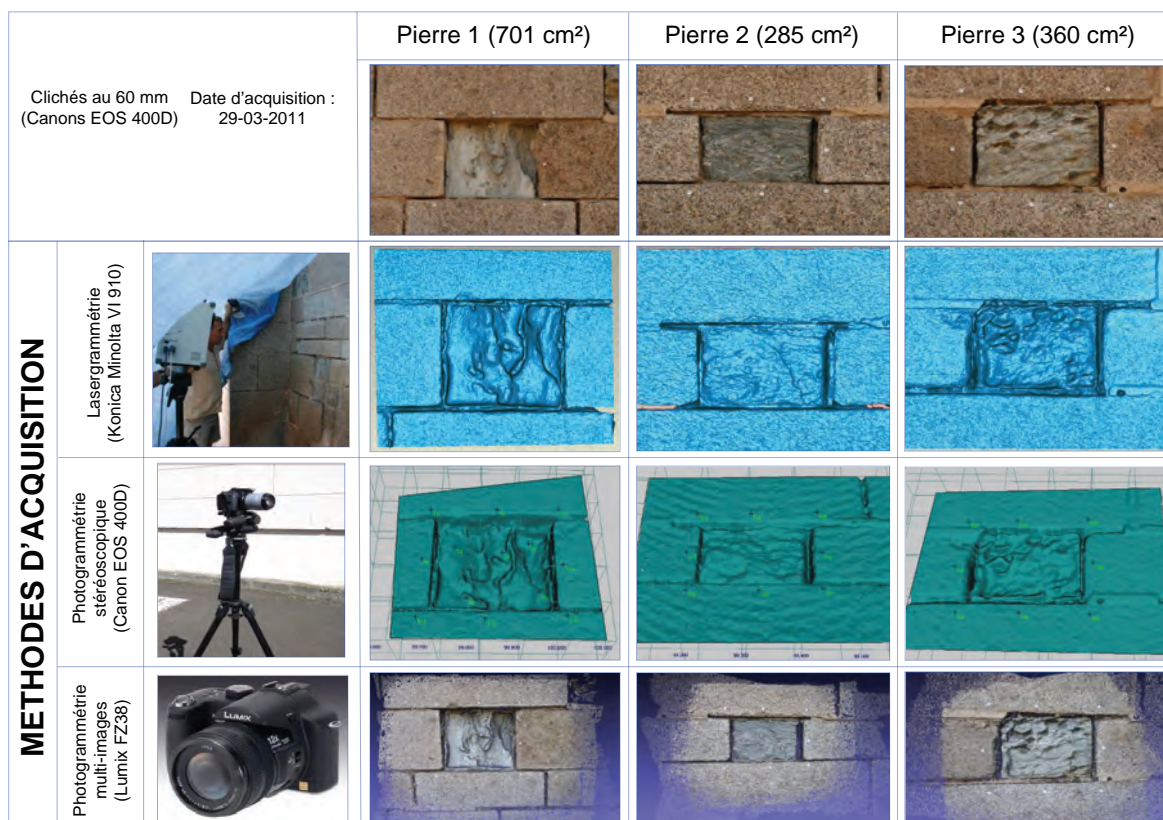


Figure 1 - Modèles 3D issus des différentes méthodes d'acquisition pour les trois pierres étudiées.

II - PHASAGE DU TRAITEMENT DES MODÈLES 3D

La première phase (Figure 2) consiste à aligner les modèles entre eux par une méthode de *best-fit* (meilleur alignement). Le modèle lasergrammétrique est utilisé comme référence sur laquelle sont alignés les deux modèles photogrammétriques. Cette solution se justifie puisque la modélisation par lasergrammétrie est issue d'une mesure directe, ne nécessitant pas d'étapes de post-traitement, ce qui est le cas pour la photogrammétrie. De plus, l'erreur de mesure annoncée par le constructeur est inférieure à seulement 200 μm . Les scènes laser sont donc, en théorie, les plus proches de la réalité géométrique des objets expertisés. Il est donc logique de les définir comme référentiel sur lequel sont alignés et testés les modèles photogrammétriques qui, *a priori*, sont moins précis.

Une fois l'alignement effectué, un plan de référence ajusté sur les encadrants granitiques de la pierre est créé. Il symbolise l'état de la pierre à son origine, c'est-à-dire avant le début de sa dégradation. Ce plan est ensuite découpé, selon l'espace délimité par la pierre (phase 2). Les nuages de points polygonés n'étant pas des objets fermés, ce plan sert de référence théorique pour l'analyse exploratoire des modèles (phase 3) : mesure des volumes exportés, de l'épaisseur moyenne et maximale de la tranche érodée, distribution spatiale et statistique de l'érosion. La phase 4 est une analyse comparative spatiale et statistique des modèles dont le but est d'évaluer les différences et donc les niveaux de précision atteints par les deux méthodes photogrammétriques.

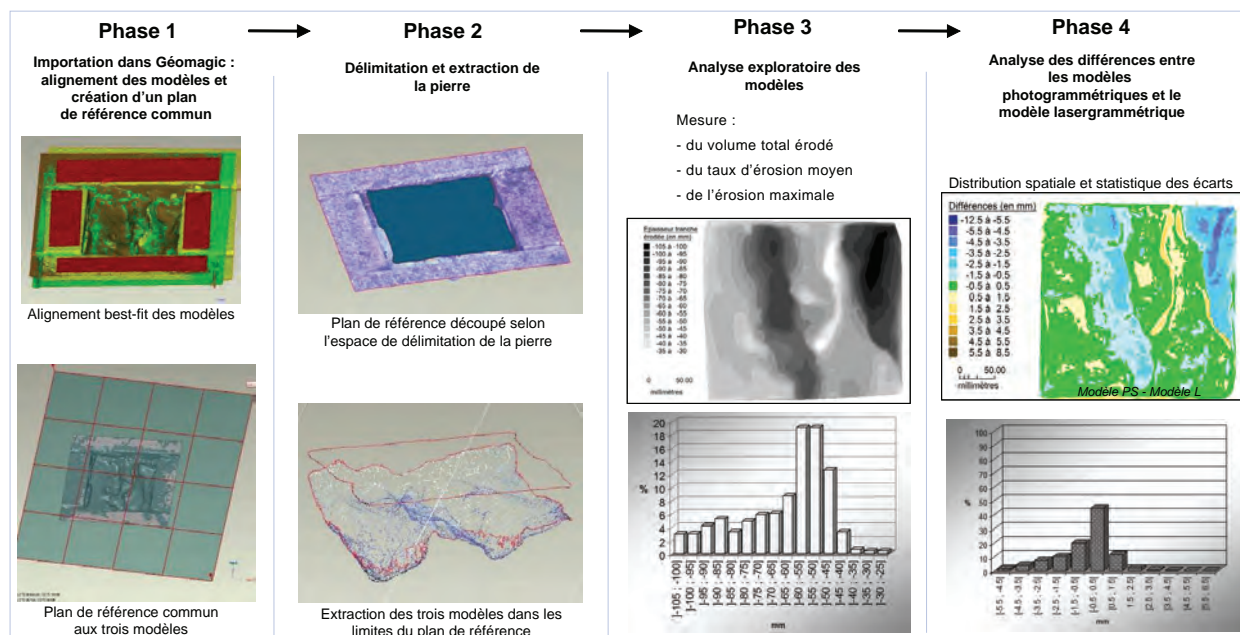


Figure 2 - Phasage du traitement dans Géomagic des nuages de points issus des 3 méthodes d'acquisition.

III - RESULTATS

Seuls les résultats issus du traitement lasergrammétrique seront présentés ici pour illustrer la distribution spatiale et statistique de l'érosion des trois pierres (Figure 3), mais les mêmes opérations ont été effectuées pour les modèles photogrammétriques. Ces résultats traduisent une spécificité propre à chaque pierre relative à l'intensité des processus d'érosion qui les ont affectées. La pierre 1 est de loin celle qui a le plus souffert avec une dégradation moyenne de 63 mm. Elle est aussi caractérisée par une érosion différentielle très marquée lui don-

nant une géométrie complexe avec des zones de surcreusement (au maximum de 104 mm) qui alternent avec des crêtes et des points durs. Rapportées à la durée d'exposition de la pierre, mise en place à la fin du 19^e siècle, ces valeurs indiquent une vitesse d'érosion moyenne annuelle de 600 μm , localement de 1 mm. L'érosion des pierres 2 et 3 a été moins soutenue avec des valeurs respectives de 16,6 et de 19,6 mm ce qui correspond à une moyenne annuelle inférieure à 200 μm . Aussi, les disparités spatiales sont-elles beaucoup moins marquées que dans le cas

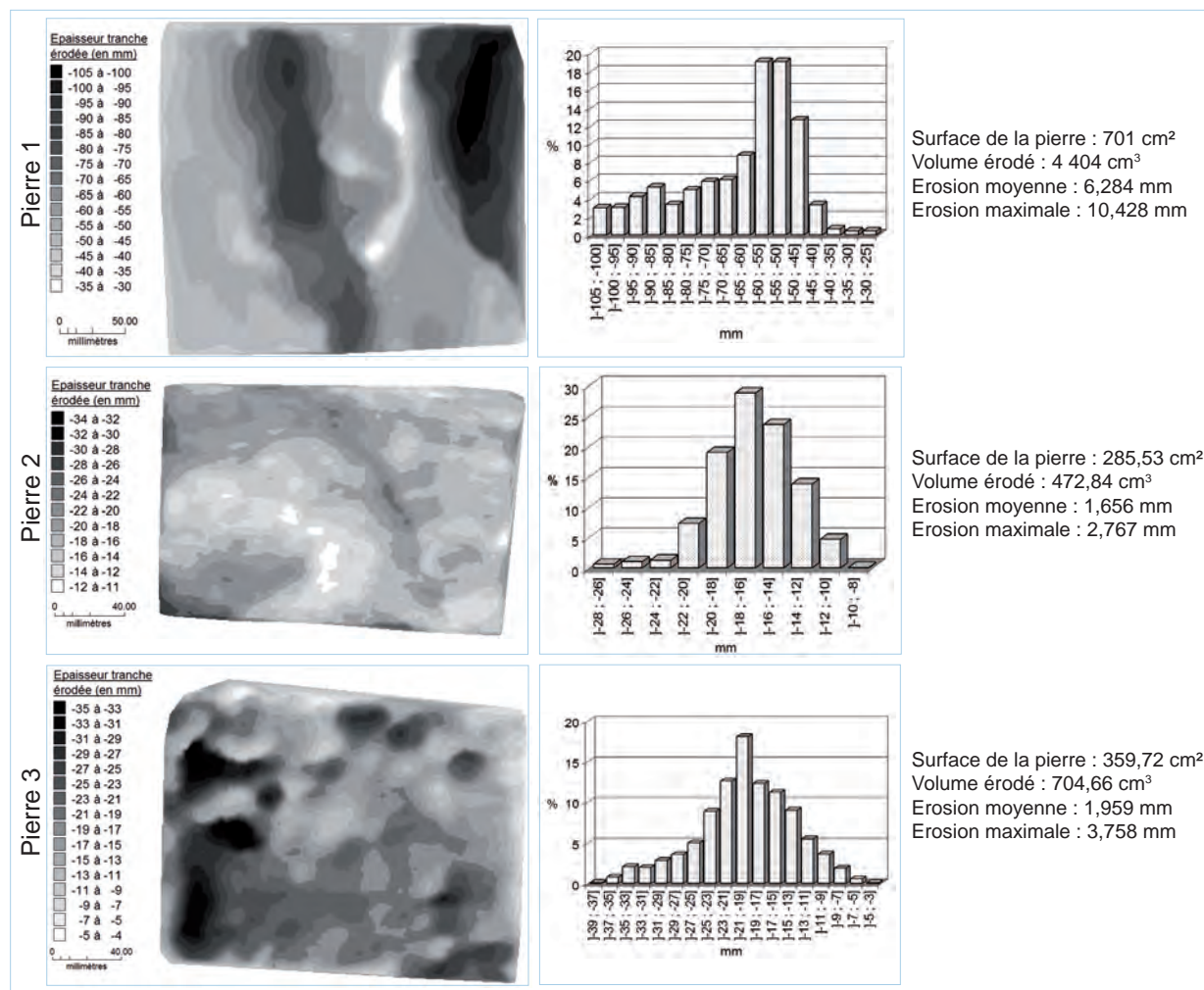


Figure 3 - Distribution spatiale et statistique de l'érosion des trois pierres (méthode lasergrammétrie).

de la pierre 1, en particulier pour la pierre 2, peu affectée par les processus d'alvéolisation.

L'analyse comparative des modèles photogramétriques (PS, PM) et lasergramétriques (L) montrent que les trois méthodes produisent des résultats très similaires (Tableau 2, Figure 4).

L'écart le plus significatif concerne la pierre 1 (méthode PS). Le volume érodé est surestimé de 41 cm³ par rapport à la méthode L ce qui correspond à une erreur relative de moins de 1 %. Pour les variables érosion moyenne et érosion maximale les différences s'expriment en centaines de microns

Méthodes	Pierre 1					Pierre 2					Pierre 3				
	L	PS	PM	≠ PS/L	≠ PM/L	L	PS	PM	≠ PS/L	≠ PM/L	L	PS	PM	≠ PS/L	≠ PM/L
Surface pierre (cm ²)	701	701	701	-	-	285,53	285,53	285,53	-	-	359,72	359,72	359,72	-	-
Volume érodé (cm ³)	4404	4445	4389	41	-15	472,84	473,71	468,54	0,87	-4,3	704,66	702,74	702,98	-1,92	-1,68
Erosion moyenne (mm)	62,84	63,42	62,68	0,58	-0,16	16,56	16,59	16,41	0,07	-0,17	19,59	19,54	19,54	-0,05	0
Erosion maximale (mm)	105,15	110,08	105,96	4,93	0,81	27,67	27,88	27,63	0,21	-0,04	37,58	37,38	37,33	-0,2	-0,25

Tableau 2 - Synthèse des résultats de la mesure de l'érosion issus des différentes méthodes de modélisation et comparaison des résultats (PS/L et PM/L).

avec un écart maximal de 580 μm pour la pierre 1. Le caractère original de cette pierre (méthode PS) est également perceptible sur la carte des différences (Figure 4). Les écarts au modèle L sont très marqués (60 % de la surface ont une erreur supérieure à 500 μm) et semblent obéir à une logique spatiale dictée par la géométrie de la pierre : l'érosion des zones les plus déprimées est surestimée, inversement l'érosion des points saillants est sous-estimée. Cette différence s'exprime moins nettement dans le cas de la méthode PM. Les écarts supérieurs à 500 μm couvrent moins de 35 % de la surface de la pierre. Pour les pierres 2 et 3, les écarts au modèle L sont peu significatifs quelle que soit la méthode uti-

lisée puisque 60 à 90 % sont inférieurs à 500 μm . Il semble donc que les différences soient plus marquées en photogrammétrie stéréoscopique en particulier pour les structures caractérisées par un relief accusé avec de brusques variations de déclivités. Ces écarts du modèle PS à la réalité de terrain sont par expérience bien connus si on se réfère à d'autres niveaux d'échelle. Par exemple, en photogrammétrie aérienne les modèles restitués sont de moins bonne qualité sur des portions de terrains difficiles à saisir comme les régions de montagne. A l'échelle de travail de ce projet, cette erreur reste relativement faible (<1 %) et n'affecte que peu sensiblement la pertinence des résultats obtenus.

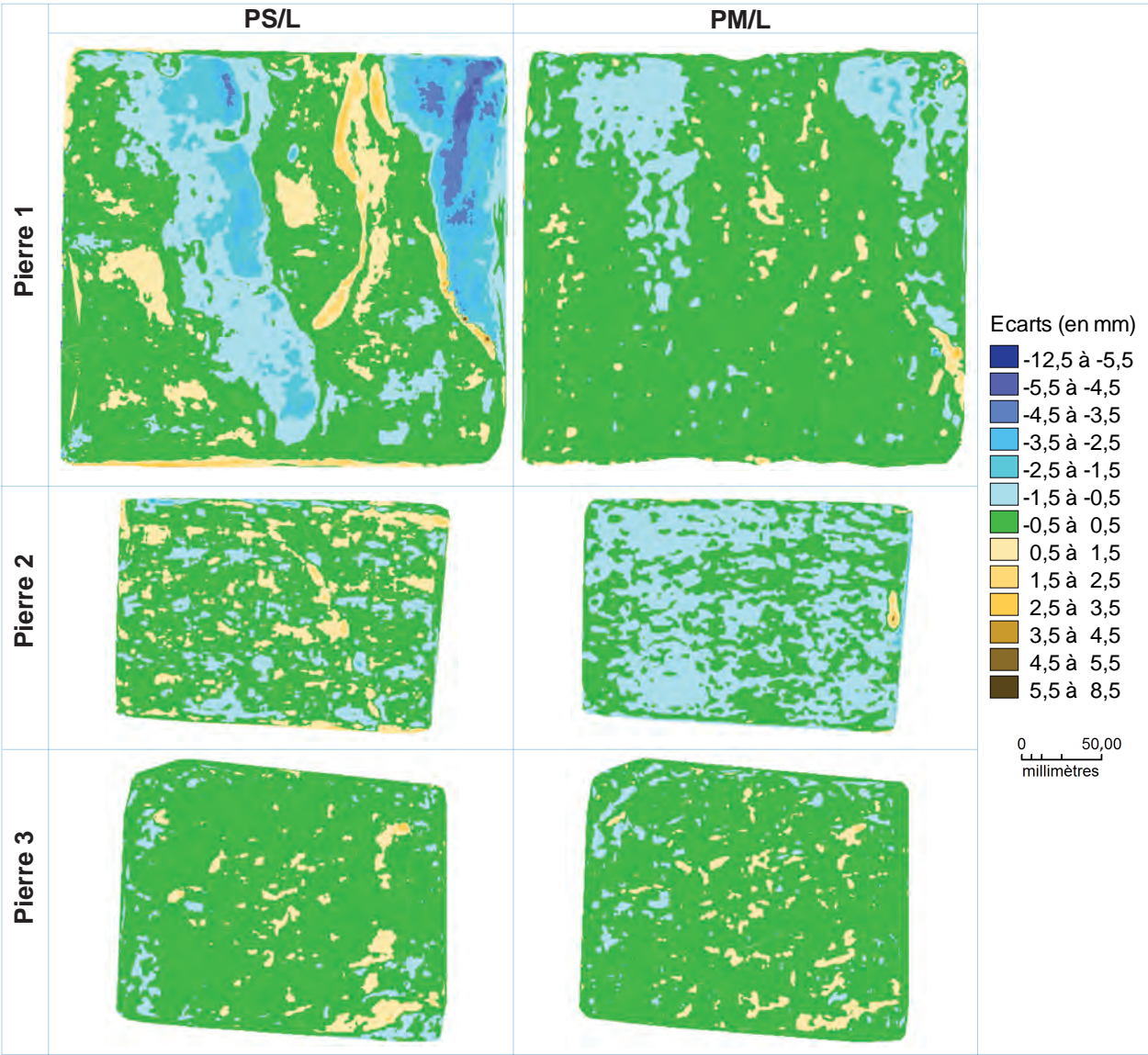


Figure 4 - Distribution spatiale des différences entre les modèles photogrammétriques stéréoscopique (PS) et multi images (PM) et le modèle lasergrammétrique (L).

CONCLUSION ET DISCUSSION

Les résultats des tests effectués sur l'abbatiale de Manglieu montrent que les deux méthodes photogrammétriques sont fiables et suffisamment précises pour autoriser leur utilisation dans un objectif de quantification de l'érosion de la pierre monumentale. Elles se présentent donc comme de très bonnes alternatives à l'utilisation du scanner laser, très coûteux (> 50 000 €), lourd à mettre en oeuvre et demandant une haute technicité. La photogrammétrie multi-images est particulièrement attrayante, car en dehors de son coût d'investissement très faible et sa légèreté d'utilisation, elle permet également la production de modèles 3D de très bonne qualité, proches des modèles lasergrammétriques. Cette haute précision s'exprime de manière quasi homogène sur l'ensemble des pierres étudiées quelle que soit leur complexité morphologique. Si l'on se réfère à la problématique initiale, la photogrammétrie stéréoscopique répond dans une moindre mesure aux exigences de qualité. Des erreurs de plusieurs millimètres sont observées en relation avec les disparités topographiques de la surface. C'est essentiellement le cas pour la pierre 1 caractérisée par une profondeur d'altération de plusieurs centimètres (10,6 au maximum) et des variations topographiques prononcées. Pour expliciter cette erreur, une hypothèse peut être formulée : la photogrammétrie stéréoscopique utilise seulement deux photographies pour reconstituer un modèle. Les points de corrélation entre les différentes

photographies ne sont donc présents que deux fois, ce qui peut expliquer l'augmentation des erreurs dans la génération des modèles pour des géométries très complexes. Au contraire, dans le cas de la photogrammétrie multi-images qui utilise plusieurs dizaines de photographies convergentes (avec un minimum de 30 pour modéliser l'objet expertisé), les points de corrélation sont très nombreux et cette multiplication de points communs (30, au maximum) permet d'obtenir des modèles plus robustes, ce qui diminue les erreurs par rapport à la référence. Mais, même si l'utilisation de la photogrammétrie multi-images paraît très convaincante, elle ne peut exclure totalement la lasergrammétrie qui conserve toute sa légitimité pour spatialiser des érosions de très faible ampleur (quelques millimètres). En effet, pour ces ordres de grandeur, il est préférable de privilégier une méthode de mesure directe plutôt qu'une méthode de mesure indirecte qui introduit, lors de la phase de traitement du modèle, des erreurs très localisées qui peuvent nuire à la qualité de la restitution. Par ailleurs, compte tenu de sa très haute précision, l'hypothèse d'un suivi diachronique de l'érosion de pierres à dégradation rapide, supérieure à 400-500 µm en moyenne annuelle, est envisageable. Des essais réalisés entre 2009 et 2011 sur la pierre 1 montrent que le scanner courte portée permet, par exemple, de détecter ces faibles valeurs de changement.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRE M-F., PHALIP B., 2010. Rates of stone recession on Mediaeval monuments : Some thoughts and methodological perspectives. A Coruña, *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 35, 13-40.
- ANDRÉ M-F., MERCIER D., ETIENNE S., VOLDOIRE O., VAUTIER F., 2008. Approche géographique des de l'érosion des temples d'Angkor : enjeux et perspectives. *Géographies. Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 1, 96-105.
- AUGEYRE M., 2006. La dégradation du patrimoine funéraire calcaire sur le littoral Atlantique français : l'exemple de l'île de Ré. Mémoire de Master 2^e année, Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, 96 p.
- BONNEAU J., 2001. Vitesse d'altération du patrimoine architectural médiéval du Bourbonnais (Massif central). Mémoire de maîtrise. Clermont-ferrand, Université Blaise Pascal, 145 p.
- FITZNER B., 1990. Mapping of natural stone monuments, documentation of lithotypes and weathering forms. Advanced Workshop "Analatical Methodologies for the Investigations of Damages Stones". Pavia (Italy), 14-21 septembre 1990, 1-24.
- GUILLLOTIN X., 1997. Mise au point d'une méthode photogrammétrique rapide appliquée à l'archéologie. Mémoire de diplôme d'ingénieur E.S.G.T. Conservatoire National des Arts et Métiers, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 132 p.
- INKPEN R-J, FONTANA D., COLLIER P., 2001. Mapping decay : integrating scales of weathering within a GIS. *Earth Sur. Proc. Landf.*, 26, 885-900.
- MOTTERSHEAD, 1994. Spatial variation in intensity of alveolar weathering of a dated sandstone structure in a coastal environment, Weston Super Mare, UK. In Robinson D.A., Williams R.G.B. (Eds.). John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Rock weathering and landform evolution. 151-174.
- ROBERT M., 2002. Essai de quantification de l'érosion historique dans le Massif central: l'exemple des églises médiévales du Puy-de-Dôme. Mémoire de maîtrise. Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, 87 p.
- VAUTIER F, VOLDOIRE O., DURACKA N. 2008. L'apport de la stéréophotogrammétrie à l'étude de la dégradation des pierres monumentales. *Géographies. Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 1, 119-126.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHOTOGRAMMÉTRIE ET DE TÉLÉDÉTECTION (SFPT)

La SFPT est une société savante créée en 1959 et gérée sous forme d'association loi de 1901 qui a pour but de favoriser le progrès dans :

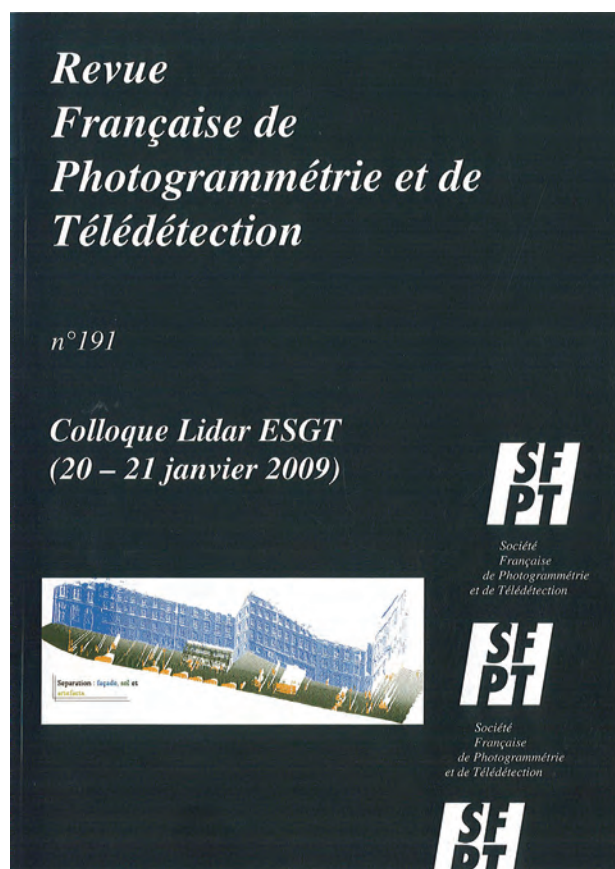
- le domaine scientifique et dans leurs diverses branches d'application de la photogrammétrie et de la télédétection
- le développement des appareils et des procédés qu'elles mettent en oeuvre pour mieux connaître la surface terrestre.

La SFPT a essentiellement pour vocation de promouvoir les techniques liées à la photogrammétrie et la télédétection, d'encourager la recherche dans ces domaines, de développer les échanges avec les sociétés scientifiques nationales et internationales (notamment avec la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection), d'entretenir les liaisons avec le milieu de l'enseignement, les ministères et les entreprises.

Les moyens d'action sont principalement : la publication d'une revue trimestrielle (la « Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection »), l'organisation de conférences et de journées scientifiques. La Revue publie des articles scientifiques revus par un comité de lecture ainsi que des informations sur la vie scientifique dans les domaines couverts par la SFPT (revue de presse, calendrier des manifestations...).

La SFPT, subventionnée par le CNES et l'IGN, compte des membres donateurs (bienfaiteurs ou de soutien), des membres adhérents et des membres d'honneur, répartis sur plus de 40 pays.

*Président : Laurent POLIDORI, Directeur de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
1, boulevard Pythagore - Campus Universitaire, 72000 Le Mans
Courriel : laurent.polidori@esgt.cnam.fr*



ASSOCIATION FRANÇAISE DE TOPOGRAPHIE (AFT)

Créée en 1978, l'AFT rapproche tous les professionnels concernés par la topographie et la géomatique (producteurs, utilisateurs, enseignants, constructeurs...) qu'ils soient publics ou privés :

- en diffusant les évolutions de l'instrumentation, de la saisie et du traitement de la géolocalisation aux moyens de publications et de sa revue scientifique et technique XYZ à parution trimestrielle ;
- en encourageant la recherche scientifique au service du progrès technique dans tous les domaines procédant la topographie par exemple en proposant chaque année le « Prix de l'AFT » qui récompense le ou les meilleurs articles de jeunes ingénieurs ;
- en promouvant une formation scientifique et technique de qualité en participant à diverses commissions d'enseignement ;
- en facilitant l'actualisation de la connaissance et du savoir de ses membres, notamment au travers de forums de la topographie qu'elle organise ;
- en faisant connaître la profession et en défendant son renom tant en France qu'à l'étranger.

Outre la topographie et la géomatique, l'AFT s'implique tout autant dans les domaines de la photogrammétrie, de la géodésie, de la métrologie, de l'hydrographie, de la cartographie, de l'histoire de la profession et des systèmes d'information géographique (SIG).

Président : Michel KASSER, Directeur de l'Ecole nationale des sciences géographiques (ENSG)

Bureau : 73, avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé cedex

Tél : 01 43 98 84 80 - Courriel : info@aftopo.org

Site Internet : <http://www.aftopo.org>

xyz



La revue XYZ est éditée par
l'association française de topographie

ASSOCIATION FRANÇAISE DE KARSTOLOGIE (AFK)

L'AFK a été créée en 1978 par Jean Nicod dans l'optique de promouvoir les recherches dans le domaine de la karstologie. Elle regroupe aujourd'hui près d'une centaine de membres, professionnels ou amateurs, qui ont tous pour intérêt l'étude des massifs karstiques et des cavités qu'ils contiennent. La karstologie bénéficie de regards croisés entre géologues, géomorphologues, hydrogéologues, biologistes mais aussi de spéléologues qui explorent avec passion les cavités et réalisent des observations essentielles.

Tout au long de l'année, plusieurs manifestations sont l'occasion d'échanges fructueux et toujours conviviaux. Les Journées de l'AFK sont essentiellement consacrées à des excursions de terrain, en France ou à l'étranger. Elles permettent à des membres de l'AFK d'exposer leurs travaux sur une région ou un massif. D'autres événements comme les RIK-RAK ou les Rencontres d'octobre combinent des présentations en salle, des excursions et des expéditions spéléologiques.

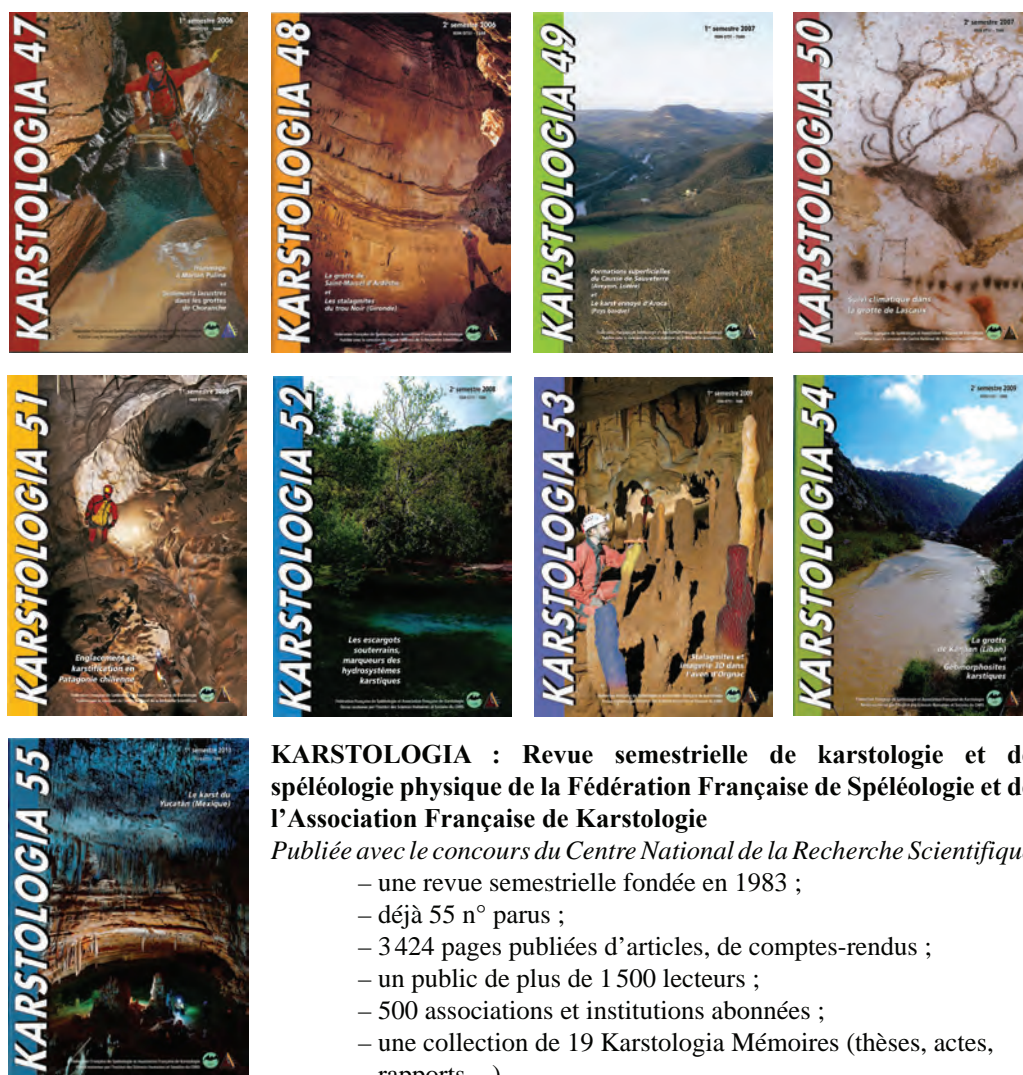
L'AFK et la Fédération Française de Spéléologie publient, avec le concours du CNRS et sous la direction du laboratoire EDYTEM, une revue semestrielle consacrée à la karstologie et la spéléologie physique. Une dizaine d'articles scientifiques de qualité sont rassemblés dans chaque numéro. Pour les travaux plus importants et concernant un thème particulier, des numéros spéciaux sont publiés dans la collection des Karstologia Mémoires.

Enfin, l'AFK est membre de la Fédération Française des Géosciences et association partenaire du Groupe Français de Géomorphologie. A ce titre, elle participe à des manifestations communes en co-organisant des colloques et des événements scientifiques. Ce travail de fond révèle l'intérêt croissant de la karstologie dans le domaine des géosciences et lui confère peu à peu un statut de discipline à part entière.

Président : Laurent BRUXELLES, INRAP et UMR 5608 du CNRS.

Courriel : laurent.bruxelles@inrap.fr

KARSTOLOGIA



KARSTOLOGIA : Revue semestrielle de karstologie et de spéléologie physique de la Fédération Française de Spéléologie et de l'Association Française de Karstologie

Publiée avec le concours du Centre National de la Recherche Scientifique

- une revue semestrielle fondée en 1983 ;
- déjà 55 n° parus ;
- 3 424 pages publiées d'articles, de comptes-rendus ;
- un public de plus de 1 500 lecteurs ;
- 500 associations et institutions abonnées ;
- une collection de 19 Karstologia Mémoires (thèses, actes, rapports...)

Collection **EDYTEM**

ISSN 1762-4304

Laboratoire **EDYTEM**
Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

Complétez votre collection !



À paraître : N° hors série - **La Mer de Glace. Objet d'art, objet de science.**

COMPLETEZ VOTRE COLLECTION

CAHIERS SAVOISIENS DE GÉOGRAPHIE			Prix du N°	Frais de port
N° 1 (1997) : Transports et développement en Pays de Savoie			10 €	3 €
N° 2 (1999) : Livret guide des excursions Grands Causses - Vercors			épuisé	
N° 3 (2000) : La géographie des risques dits «naturels» entre géographie fondamentale et géographie appliquée			10 €	3 €
N° 4 (2001) : Identités et territoires			10 €	3 €

COLLECTION EDYTEM				
N° 1 (2003) : Dynamique et vulnérabilités des milieux montagnards méditerranéens et alpins			15 €	3 €
N° 2 (2004) : Traverser les montagnes			15 €	3 €
N° 3 (2005) : Le Quaternaire des vallées alpines			épuisé, pdf en ligne *	
N° 4 (2006) : Transport et Tourisme			15 €	3 €
N° 5 (2007) : L'Aven d'Orgnac, valorisation touristique, apports scientifiques			15 €	3 €
N° 6 (2008) : Du climat à l'homme : Dynamique holocène de l'environnement dans le Jura et les Alpes			15 €	3 €
N° 7 (2008) : Karsts de montagne : Géomorphologie, patrimoine et ressources			15 €	3 €
N° 8 (2009) : Neige et glace de montagne : reconstitution, dynamique, pratiques			épuisé, pdf en ligne *	
N° 9 (2009) : L'hydrothermalisme en domaine continental : Fonctionnement, ressource et patrimoine			15 €	3 €
N° 10 (2010) : Espaces protégés, acceptation sociale et conflits environnementaux			15 €	3 €
N° 11 (2010) : Panorama de la dendrochronologie en France			15 €	3 €
N° 12 (2011) : Images et modèles 3D en milieux naturels			15 €	3 €

* Site web du laboratoire : <http://edytem.univ-savoie.fr/>
Plus d'informations sur chacun des documents sur ce site,
ainsi que les pdf en ligne des numéros épuisés.

Pour recevoir ces publications, adressez votre commande à :

Laboratoire EDYTEM, secrétariat, Université de Savoie, Campus scientifique,
73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France (ou à sec-edytem@univ-savoie.fr),
accompagnée d'un chèque (à l'ordre de M. l'Agent Comptable de l'Université
de Savoie), ou d'un mandat administratif.

IMAGES et MODÈLES 3D en MILIEUX NATURELS

Sommaire

Éditorial

JAILLET S. *et al.* - Images et modèles 3D en milieux naturels. Une école thématique à la croisée disciplinaire.

THÉORIES, CONCEPTS, MÉTHODES

GRUSSENMEYER P. *et al.* - Lasergrammétrie terrestre.

VALLET J. - La lasergrammétrie aéroportée, approches théoriques, concepts, méthodes.

EGELS Y. - La photogrammétrie, principes généraux et terminologie.

PIERROT DESEILLIGNY M. *et al.* - Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels.

APPLICATIONS - TRAVAUX DU LABORATOIRE EDYTEM

RAVANEL L. *et al.* - Suivi morphodynamique des parois rocheuses du massif du Mont Blanc par laserscanning terrestre.

BODIN X. - Apport des données de LiDAR terrestre pour le suivi et l'analyse du déplacement d'un glacier rocheux.

GRANGE C. *et al.* - Consolidation par optimisation en vue d'une analyse diachronique par SLT de la falaise de glace du lac du Miage.

DELINE P. *et al.* - Sept ans de suivi de la dynamique de la falaise de glace du lac du Miage (massif du Mont Blanc) par scanner laser terrestre.

ASTRADE L. *et al.* - Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels.

JAILLET S. *et al.* - Topographie, représentation et analyse morphologique 3D de drains, de conduits et de parois du karst.

BOCHE É. *et al.* - Enregistrement et modélisation 3D de la fouille archéologique et paléontologique du cône d'entrée d'Orgnac.

SADIER B. *et al.* - Relevés laser et calibration sur calcite de spéléothèmes pour une étude paléo-sismologique du Liban.

HAJRI S. *et al.* - Identification et extraction par segmentation de spéléothèmes de l'aven d'Orgnac (Ardèche, France).

PLOYON E. *et al.* - Acquisition et traitements de nuages de points 3D par des techniques légères et à faibles coûts.

APPLICATIONS - TRAVAUX PRÉSENTÉS À L'ÉCOLE THÉMATIQUE

TACON S. *et al.* - Étude des changements morphologiques d'une rivière en tresses par LiDAR aéroporté.

LADET S. *et al.* - Mission d'acquisition aérienne LiDAR pour des applications thématiques en écologie du paysage.

BURENS A. *et al.* - Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux. Approche multiscalaire.

POPRAWSKI Y. - Modélisation du diapiir de Bakio. Utilisation de données LiDAR pour la modélisation en 3D de surfaces géologiques.

RÉGAGNON E. *et al.* - Plan urbain et SIG archéologique. L'exemple de Qalhat (Oman).

VAUTIER F. *et al.* - Comparaison lasergrammétrie / photogrammétrie pour la mesure de l'érosion de pierres de façade.



La «Collection Edytem» a pour objet de mettre en avant l'apport de la géographie, de la géologie et des sciences de l'environnement dans l'étude des milieux et territoires de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle met en avant les travaux réalisés au sein du laboratoire Edytem et les résultats de ses programmes et actions de recherche.

Prix 15 euros

ISBN 978-2-918435-04-4

